



**TUGAS AKHIR -TE 141599**

**PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA  
PHASA DENGAN *DIRECT TORQUE CONTROL*  
BERBASIS *NEURO FUZZY***

Yani Ikhsan Yusuf  
NRP 2212106085

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Mochammad Rameli  
Ir. Rusdhianto Effendie A.K,MT

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**FINAL PROJECT - TE141599**

***THREE PHASE INDUCTION MOTOR SPEED CONTROL  
WITH DIRECT TORQUE CONTROL BASED NEURO  
FUZZY***

Yani Ikhsan Yusuf  
NRP 2212106085

***Advisor***

Dr. Ir. Mochammad Rameli  
Ir. Rusdhianto Effendi A.K, M.T

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2015

**PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA  
DENGAN *DIRECT TORQUE CONTROL* BERBASIS *NEURO  
FUZZY***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Dr.Ir.Mochammad Rameli**

NIP. 195412271981031002

**Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T**

NIP. 195704241985021001

**SURABAYA  
JANUARI, 2015**

# **PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DENGAN *DIRECT TORQUE CONTROL* BERBASIS *NEURO FUZZY***

**Nama** : Yani Ikhsan Yusuf  
**Dosen Pembimbing 1** : Dr. Ir. Mochammad Rameli  
**Dosen Pembimbing 2** : Ir. Rusdhianto Effendi A.K, M.T.

## **ABSTRAK**

Motor induksi tiga phasa memiliki model yang tidak linier sehingga di dalam pengaturan kecepatannya relatif sulit. Dengan metode pengaturan motor induksi yang tepat dapat diperoleh kontroler motor induksi yang dapat menghasilkan performa yang baik. Metode *Direct Torque Control* merupakan metode vektor kontrol yang dapat mengatur torsi referensi motor induksi secara langsung.

Dalam pengaplikasiannya apabila terjadi perubahan beban, metode tersebut tidak dapat mengikuti perubahan tersebut. Pada tugas akhir ini, digunakan kontroler cerdas *Neuro Fuzzy* supaya kecepatan aktual motor dapat mengikuti kecepatan referensi apabila terjadi perubahan beban.

Hasil simulasi kontroler *Neuro Fuzzy* pada motor induksi menunjukkan bahwa dengan kontroler *Neuro Fuzzy* respon kecepatan motor dapat mengikuti kecepatan referensi. Pada kondisi tanpa beban diperoleh *settling time* sebesar 1,202 detik, *rise time* 0,9447 detik, *overshoot* sebesar 0,25% dan tidak ada *error steady state*. Pada perubahan beban langsung semakin besar nilai perubahan beban, nilai *settling time* semakin lama sekitar 0,4 sampai 0,7 detik. Pada perubahan beban *gradual* waktu *settling time* yang diperoleh setiap perubahan beban sama yaitu 1,6 detik.

**Kata kunci :** *Direct Torque Control*, *Neuro Fuzzy* ,Motor induksi tiga phasa.

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

# ***THREE PHASE INDUCTION MOTOR SPEED CONTROL WITH DIRECT TORQUE CONTROL BASED NEURO FUZZY***

***Name*** : Yani Ikhsan Yusuf  
***Advisor 1*** : Dr. Ir. Mochammad Rameli  
***Advisor 2*** : Ir. Rusdhianto Effendi A.K, M.T.

## ***ABSTRACT***

*Three phase induction motor has a nonlinear model so that within the speed control is relatively difficult. With the induction motor control method is right can be obtained good performance. Direct torque control method is vector control method that can set the reference torque induction motor directly.*

*In its application in the event of load changes, such methods are not able to follow these changes. In this final project use of intelligent neuro fuzzy controller so that the actual speed of the motor can follow the speed reference when the load changes.*

*The simulation results of neuro fuzzy controller on induction motor showed that the neuro fuzzy controller response speed of the motor can follow the reference speed. In the no-load condition is obtained settling time 1.202 seconds, rise time 0.9447 seconds, overshoot 0.25% and no steady state error. In direct load changes, the greater value of the load changes, the value of settling time obtained the longer about 0.4 to 0.7 seconds. At gradual load changes, settling time is obtained every 1.6 seconds load changes.*

***Keywords :*** Direct Torque Control, Neuro Fuzzy, Three-Phase Induction Motors.

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Allah *Subhanahu wa ta'ala*, berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik dan tepat waktu. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Strata-I pada bidang studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Terima kasih penulis ucapkan kepada orang tua dan kakak-kakak penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan. Pak Rameli dan pak Rusdhi selaku Dosen pembimbing yang telah membimbing dari awal sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini, teman-teman SP LJGenap 2012 serta pihak-pihak yang mendukung dan memotivasi penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Saran dan kritik penulis harapkan guna memperbaiki tugas akhir ini. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu kedepannya.

Surabaya, Januari 2015

Penulis



*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

# DAFTAR ISI

## HALAMAN

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xi</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL .....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan .....	2
1.4. Metodologi.....	2
1.5. Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB 2 TEORI DASAR .....</b>	<b>5</b>
2.1. Motor Induksi 3 Phasa .....	5
2.1.1. Konsep Dasar Motor Induksi .....	6
2.1.2. Slip .....	7
2.2. Model Dinamik Motor Induksi 3 Phasa .....	7
2.2.1. Transformasi Koordinat .....	8
2.2.2. Persamaan Dinamik Motor Induksi 3 Phasa ...	9
2.2.2.1. <i>Stationary Reference Frame</i> .....	11
2.2.2.2. <i>Synchronously Rotating Frame</i> .....	12
2.3. Metode <i>Direct Torque Control</i> (DTC) .....	13
2.3.1. Estimator Fluks, Torsi dan Sektor Fluks Stator	14
2.3.2. Komparator pada DTC.....	15
2.3.3. <i>Switching Table</i> .....	16
2.3.4. <i>Inverter</i> .....	18
2.4. Logika <i>Fuzzy</i> .....	20
2.4.1. Himpunan <i>Fuzzy</i> ( <i>Fuzzy Set</i> ) .....	20

2.4.2.	Fungsi Keanggotaan ( <i>Membership Function</i> )	20
2.4.3.	Kontroler Logika <i>Fuzzy</i> .....	22
2.5.	Jaringan Syaraf Tiruan .....	25
2.6.	Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> .....	27
2.6.1.	Tahapan <i>Forward Propagation</i> .....	28
2.6.2.	Tahapan <i>Backward Propagation</i> .....	30
<b>BAB 3</b>	<b>PERANCANGAN SISTEM .....</b>	<b>31</b>
3.1.	Diagram Blok Sistem .....	31
3.2.	Perancangan Model Motor Induksi 3 Phasa .....	32
3.2.1.	Persamaan Motor Induksi .....	33
3.2.2.	Transformasi abc ke dq .....	35
3.2.3.	Perhitungan Tetha .....	37
3.2.4.	Perhitungan Kecepatan .....	37
3.3.	Perancangan <i>Direct Torque Control</i> (DTC) .....	38
3.3.1.	Blok Estimator .....	38
3.3.2.	Perancangan Sektor Sudut Fluks Stator pada DTC .....	39
3.3.3.	Perancangan Blok Komparator .....	39
3.3.4.	Perancangan Blok <i>Switching Table</i> .....	40
3.3.5.	Perancangan Blok <i>Inverter</i> .....	41
3.4.	Perancangan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> .....	41
3.4.1.	Tahap <i>Forward Propagation</i> .....	42
3.4.2.	Tahap <i>Backward Propagation</i> .....	44
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL SIMULASI DAN ANALISA SISTEM ....</b>	<b>45</b>
4.1.	Gambaran Singkat Simulasi Sistem .....	45
4.2.	Simulasi Motor induksi 3 phasa .....	45
4.3.	Simulasi dan Pengujian <i>Direct Torque Control</i> (DTC) dengan Kontroler PI .....	46
4.3.1.	Simulasi dan Pengujian Tanpa beban .....	47
4.3.2.	Simulasi dan Pengujian dengan Perubahan Beban Langsung .....	48
4.3.2.1.	<i>Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Nominal</i> .....	48
4.3.2.2.	<i>Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Minimal</i> .....	49
4.3.2.3.	<i>Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Maksimal</i> .....	50

4.3.3. Simulasi dan Pengujian pada perubahan Gradual .....	51
4.4. Simulasi dan Pengujian <i>Direct Torque Control</i> (DTC) dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> .....	53
4.4.1. Proses <i>Learnig</i> Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> .....	53
4.4.2. Simulasi dan Pengujian Tanpa Beban .....	55
4.4.3. Simulasi dan Pengujian dengan Perubahan Beban Langsung .....	56
4.4.3.1. Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Nominal .....	56
4.4.3.2. Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Minimal .....	58
4.4.3.3. Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Maksimal .....	59
4.4.4. Simulasi dan Pengujian pada Perubahan Beban <i>Gradual</i> .....	60
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>	<b>63</b>
5.1. Kesimpulan .....	63
5.2. Saran .....	63
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>65</b>
<b>LAMPIRAN A .....</b>	<b>67</b>
A.1. <i>Listing</i> Program <i>Neuro Fuzzy</i> .....	67
A.2. <i>Listing</i> Program Persamaan Model Motor Induksi ..	70
A.3. <i>Listing</i> Program Inisisalisasi Parameter Motor Induksi 3 phasa .....	71
<b>LAMPIRAN B .....</b>	<b>73</b>
B.1. Diagram <i>Simulink</i> simulasi Sistem .....	73
B.1. Diagram <i>Simulink</i> Identifikasi Sistem .....	74
<b>DAFTAR RIWAYAT PENULIS .....</b>	<b>75</b>

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

## DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
<b>Gambar 2.1.</b> Motor Induksi Tiga Fasa <i>Squirrel cage</i> .....	5
<b>Gambar 2.2.</b> Bentuk Gelombang Sinusoida dan Timbulnya Medan Magnet.....	6
<b>Gambar 2.3.</b> Transformasi Clarke .....	8
<b>Gambar 2.4.</b> Transformasi Park .....	9
<b>Gambar 2.5.</b> <i>Coupling effect</i> pada belitan Stator dan Rotor ....	10
<b>Gambar 2.6.</b> Kumparan Stator dan Rotor Motor Induksi Tiga fasa pada koordinat abc .....	10
<b>Gambar 2.7.</b> Klasifikasi Pengaturan Motor Induksi .....	13
<b>Gambar 2.8.</b> Diagram Blok <i>Direct Torque Control</i> (DTC) .....	14
<b>Gambar 2.9.</b> (a) Fluks Histeresis Komparator, (b) Torsi Histeresis Komparator .....	16
<b>Gambar 2.10.</b> Vektor Tegangan Inverter dan Sektor <i>Switching</i> Fluks Stator pada DTC konvensional dan modifikasi.....	18
<b>Gambar 2.11.</b> Topologi <i>Three Phase, Two Level VSI</i> .....	18
<b>Gambar 2.12.</b> Bentuk – bentuk <i>Membership Function</i> .....	21
<b>Gambar 2.13.</b> Struktur Kontroler <i>Fuzzy</i> .....	22
<b>Gambar 2.14.</b> Struktur Fungsi Keanggotaan <i>Fuzzy</i> .....	22
<b>Gambar 2.15.</b> Struktur Model Jaringan Syaraf Tiruan .....	25
<b>Gambar 2.16.</b> Struktur Formulasi <i>Forward</i> .....	26
<b>Gambar 2.17.</b> Struktur Formulasi <i>Backward</i> .....	26
<b>Gambar 2.18.</b> Struktur Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> dengan 2 masukkan .....	27
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram Blok Sistem .....	31
<b>Gambar 3.2.</b> <i>Embedded Matlab Function</i> Motor Induksi 3 Fasa .....	35
<b>Gambar 3.3.</b> Blok Transformasi Tegangan abc2dq .....	36
<b>Gambar 3.4.</b> Transformasi Arus dq2abc .....	36
<b>Gambar 3.5.</b> Blok Perhitungan tetha ( $\Theta$ ) .....	37
<b>Gambar 3.6.</b> Blok Perhitungan Kecepatan .....	38
<b>Gambar 3.7.</b> Blok Estimator DTC .....	38
<b>Gambar 3.8.</b> Blok Sektor Sudut Fluks Stator .....	39

<b>Gambar 3.9.</b>	(a) Blok Komparator Torsi, (b) Blok Komparator Fluks .....	40
<b>Gambar 3.10.</b>	Blok <i>Switching Table</i> .....	40
<b>Gambar 3.11.</b>	Blok Inverter .....	41
<b>Gambar 3.12.</b>	Struktur <i>Neuro Fuzzy</i> .....	42
<b>Gambar 3.13.</b>	Fungsi Keanggotaan : (a) <i>Error</i> , (b) <i>Delta Error</i> .....	43
<b>Gambar 3.14.</b>	Fungsi <i>Singleton</i> Sinyal Keluaran .....	44
<b>Gambar 4.1.</b>	Respon Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa ....	46
<b>Gambar 4.2.</b>	Respon Torsi Motor Induksi Tiga Fasa .....	46
<b>Gambar 4.3.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler PI pada Kondisi tanpa Beban .....	47
<b>Gambar 4.4.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler PI pada Kondisi tanpa Beban .....	47
<b>Gambar 4.5.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan Beban nominal .....	48
<b>Gambar 4.6.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan Beban nominal .....	49
<b>Gambar 4.7.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan Beban Minimal .....	49
<b>Gambar 4.8.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan Beban Minimal .....	50
<b>Gambar 4.9.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan Beban Maksimal .....	50
<b>Gambar 4.10.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan Beban Maksimal .....	51
<b>Gambar 4.11.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan <i>gradual</i> selama 2 detik .....	51
<b>Gambar 4.12.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan <i>gradual</i> selama 2 detik .....	52
<b>Gambar 4.13.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan <i>gradual</i> selama 1 detik .....	52
<b>Gambar 4.14.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler PI pada Perubahan <i>gradual</i> selama 1 detik .....	53
<b>Gambar 4.15.</b>	Respon Proses <i>Learning</i> Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> .....	54
<b>Gambar 4.16.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada Kondisi tanpa Beban .....	55
<b>Gambar 4.17.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada Kondisi tanpa Beban .....	56

<b>Gambar 4.18.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada Perubahan Beban Nominal ....	57
<b>Gambar 4.19.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada Perubahan Beban Nominal .....	57
<b>Gambar 4.20.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada Perubahan Beban Minimal ....	58
<b>Gambar 4.21.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada Perubahan Beban Minimal .....	59
<b>Gambar 4.22.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada Perubahan Beban Maksimal ..	59
<b>Gambar 4.23.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada Perubahan Beban Maksimal .....	60
<b>Gambar 4.24.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler <i>NeuroFuzzy</i> pada perubahan <i>gradual</i> selama 2 detik .....	61
<b>Gambar 4.25.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada perubahan <i>gradual</i> selama 2 detik ...	61
<b>Gambar 4.26.</b>	Respon Kecepatan Motor dengan Kontroler <i>NeuroFuzzy</i> pada perubahan <i>gradual</i> selama 1 detik .....	62
<b>Gambar 4.27.</b>	Respon Torsi Motor dengan Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> pada perubahan <i>gradual</i> selama 1 detik ...	62



*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

## DAFTAR TABEL

### HALAMAN

<b>Tabel 2.1.</b>	<i>Switching Table</i> dari Vektor Tegangan <i>Inverter</i> .....	17
<b>Tabel 2.2.</b>	Nilai Tegangan Vektor pada <i>Inverter</i> .....	19
<b>Tabel 3.1.</b>	Parameter-Parameter Motor Induksi Tiga Fasa .....	32
<b>Tabel 3.2.</b>	Tabel Basis Aturan Mack Vicar Wheelan .....	43
<b>Tabel 4.1.</b>	Tabel Identifikasi Parameter .....	54
<b>Tabel 4.2.</b>	Parameter Kontroler <i>Neuro Fuzzy</i> .....	55

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

## DAFTAR SIMBOL

$s$	: Slip
$n_s$	: Kecepatan stator (medan putar)
$n$	: Kecepatan rotor
$\omega$	: Kecepatan referensi
$f$	: Frekuensi motor
$p$	: Jumlah pasang kutub
$T_{23}$	: Matriks transformasi 3 fasa ke 2 fasa
$V_{abcs}$	: Tegangan 3 fasa stator
$V_{abcr}$	: Tegangan 3 fasa rotor
$i_{abcs}$	: Arus 3 fasa stator
$i_{abcr}$	: Arus 3 fasa rotor
$\Psi_{abcs}$	: Fluks 3 fasa stator
$\Psi_{abcr}$	: Fluks 3 fasa rotor
$R_s$	: Resistansi stator
$L_s$	: Induktansi stator
$L_r$	: Induktansi rotor
$M/L_m$	: Induktansi mutual
$V_{\alpha\beta s}$	: Tegangan 2 fasa stator pada <i>stationary frame</i>
$V_{\alpha\beta r}$	: Tegangan 2 fasa rotor pada <i>stationary frame</i>
$i_{\alpha\beta s}$	: Arus 2 fasa stator pada <i>stationary frame</i>
$i_{\alpha\beta r}$	: Arus 2 fasa rotor pada <i>stationary frame</i>
$\Psi_{\alpha\beta s}$	: Fluks 2 fasa stator pada <i>stationary frame</i>
$\Psi_{\alpha\beta r}$	: Fluks 2 fasa rotor pada <i>stationary frame</i>
$V_{dqs}$	: Tegangan 2 fasa stator pada <i>synchronously rotating frame</i>
$V_{dqr}$	: Tegangan 2 fasa rotor pada <i>synchronously rotating frame</i>
$i_{dqs}$	: Arus 2 fasa stator pada <i>synchronously rotating frame</i>
$i_{dqr}$	: Arus 2 fasa rotor pada <i>synchronously rotating frame</i>
$\Psi_{dqs}$	: Fluks 2 fasa stator pada <i>synchronously rotating frame</i>
$\Psi_{dqr}$	: Fluks 2 fasa rotor pada <i>synchronously rotating frame</i>
$T_e$	: Torsi elektromagnetik
$\omega_{mech}$	: Kecepatan mekanik rotor
$\omega_r$	: Kecepatan elektrik rotor
$\omega_e$	: Kecepatan medan putar
$\alpha$	: Sudut fluks stator
$\Psi_{ref}^s$	: Fluks referensi pada <i>stationary frame</i>
$\Psi_{est}^s$	: Fluks estimasi pada <i>stationary frame</i>
$T_{ref}$	: Torsi referensi

$T_{est}$	: Torsi estimasi
$\Delta T_e$	: Nilai kesalahan Torsi
$\Delta \psi^s$	: Nilai kesalahan fluks
$V_s^s$	: Tegangan 3 fasa dari <i>inverter</i>
$V_{dc}$	: Tegangan DC <i>inverter</i>
$V_{an}$	: Tegangan fasa a ke netral motor
$V_{bn}$	: Tegangan fasa b ke netral motor
$V_{cn}$	: Tegangan fasa c ke netral motor
$V_{ao}$	: Tegangan fasa a ke netral sumber
$V_{bo}$	: Tegangan fasa b ke netral sumber
$V_{co}$	: Tegangan fasa c ke netral sumber
$V_{ab}$	: Tegangan fasa a ke fasa b
$V_{bc}$	: Tegangan fasa b ke fasa c
$V_{ca}$	: Tegangan fasa c ke fasa a
$P$	: Daya motor
$J$	: Momen Inersia
$T_{nom}$	: Torsi nominal motor
$T_{max}$	: Torsi maksimal motor
$\tau_r$	: Konstanta waktu rotor
$\theta$	: Sudut rotor

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penggerak elektrik banyak digunakan dalam beberapa aplikasi industri maupun sistem transportasi. Aplikasi penggerak elektrik pada umumnya dibagi ke dalam dua bagian yaitu *constant-speed drive* dan *variabel-speed drive*. Pada aplikasi *constant-speed drive* biasanya digunakan motor AC, sedangkan motor DC lebih banyak digunakan pada aplikasi *variable-speed drive*[1].

Motor DC mempunyai kekurangan seperti harganya mahal, inersia rotor tinggi dan perawatannya susah khususnya pada bagian komutator dan *brushes*. Motor AC khususnya motor induksi tidak mempunyai kekurangan seperti motor DC, karena mempunyai konstruksi yang sederhana, kokoh dan performa yang lebih baik. Dalam aplikasi penggerak elektrik motor induksi lebih sulit untuk dikendalikan tidak seperti pengaturan motor DC. Pengaturan dan perhitungan motor induksi pada umumnya lebih kompleks daripada motor DC dan kompleksitas tersebut menjadi lebih rumit jika performa yang diinginkan lebih baik [1].

Untuk mengatasi kompleksitas di dalam pengaturan motor induksi maka diperlukan suatu metode pengaturan yang dapat mengatur kecepatan motor induksi seperti mengatur kecepatan motor DC. Salah satu metode pengaturan motor induksi adalah metode vektor kontrol yang berdasarkan hubungan pada kondisi dinamik. Pada metode vektor kontrol tidak hanya mengatur besar dan frekuensi kecepatan angular tetapi juga mengatur posisi dari vektor ruang tegangan, arus dan fluks stator [2].

Salah satu metode vektor kontrol yang banyak digunakan adalah *Field-Oriented Control* (FOC) yang dapat mengatur motor induksi seperti motor DC eksitasi terpisah. Akan tetapi, metode FOC mempunyai beberapa kekurangan yaitu membutuhkan transformasi koordinat, pengaturan arus, sensitif terhadap perubahan parameter dan sistem menjadi lebih kompleks. Untuk mengatasi masalah tersebut digunakan metode *Direct Torque Control* (DTC) yang struktur pengaturannya lebih sederhana dan tidak banyak perhitungan.

Metode DTC memungkinkan secara langsung mengatur kondisi *switching* pada inverter dengan *Space Vector Modulation*. Meskipun

demikian, skema pengaturan DTC konvensional masih menggunakan kontroler PI sehingga apabila terjadi perubahan beban pada motor maka respon kecepatan motor akan turun, tidak sesuai dengan kecepatan referensi yang diberikan.

Untuk mengatasi hal tersebut pada tugas akhir ini diterapkan metode DTC modifikasi dengan kontroler *Neuro Fuzzy* untuk mengatur batas dari nilai referensi torsi sehingga dapat memperbaiki respon kecepatan motor pada kondisi *steady state* maupun kondisi *transien* pada saat terjadi perubahan beban pada motor.

## 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan *Direct Torque Control* (DTC) berbasis kontroler *Neuro Fuzzy* untuk memperbaiki respon kecepatan dari motor induksi tiga fasa sehingga kecepatan aktual motor sesuai dengan kecepatan referensi yang diberikan pada saat terjadi perubahan beban maupun tidak terjadi perubahan beban.

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah untuk merancang simulasi *Direct Torque Control* berbasis kontroler *neuro fuzzy* untuk pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa sehingga dapat memperbaiki respon kecepatan dari motor induksi tiga fasa saat terjadi perubahan beban dan sesuai dengan respon model yang diinginkan.

## 1.4 Metodologi

Metodologi yang dilakukan dalam pengerjaan Tugas akhir ini terdiri dari beberapa tahap, yaitu :

### a. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai motor induksi tiga fasa melalui buku teks, jurnal, artikel, internet dan lain-lain.

### b. Pemodelan Sistem

Pada tahap ini dibuat pemodelan motor induksi tiga fasa serta *Direct Torque Control* (DTC).

### c. Desain Kontroler

Pada tahap ini dibuat struktur kontroler *Neuro Fuzzy* untuk pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa.

d. Simulasi

Pemodelan motor induksi dan hasil desain kontroler disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB.

e. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Penyusunan buku Tugas Akhir meliputi pendahuluan, teori penunjang, perancangan sistem, simulasi dan analisa sistem serta penutup.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Pada Tugas Akhir ini sistematika penulisan dibagi menjadi lima bab, yaitu :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini meliputi latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 : Teori Penunjang

Bab ini membahas tinjauan pustaka yang membantu penelitian, di antaranya konsep motor induksi tiga fasa, teori pemodelan dinamik motor induksi, teori *Direct Torque Control* (DTC), dan teori kontroler *Neuro Fuzzy*.

Bab 3 : Perancangan Sistem

Pada bab ini dijelaskan mengenai perancangan model dinamik motor induksi tiga fasa dan *Direct Torque Control* (DTC) serta algoritma kontroler *Neuro Fuzzy*.

Bab 4 : Simulasi dan Analisa Sistem

Bab ini memuat hasil simulasi kontroler pada sistem dan analisa sistem.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.



*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

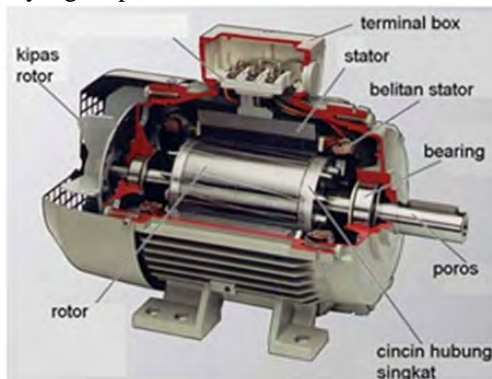
## BAB 2

### TEORI DASAR

Bab ini membahas mengenai tinjauan pustaka yang berisi landasan teori di dalam pembuatan Tugas Akhir. Beberapa landasan teori yang digunakan antara lain mengenai motor induksi tiga fasa, model dinamik motor induksi 3 fasa, metode *Direct Torque Control* (DTC) serta kontroler *Neuro Fuzzy*.

#### 2.1. Motor Induksi 3 Fasa [5]

Motor induksi 3 fasa banyak digunakan untuk aplikasi-aplikasi di industri karena konstruksi dari motor induksi yang sederhana, kokoh, handal, mudah perawatannya dan relatif murah harganya. Kebanyakan motor induksi bertipe *rotary* yang pada dasarnya terdiri dari stator yang diam dan rotor yang berputar.



**Gambar 2.1** Motor Induksi Tiga Fasa *Squirrel Cage*

Stator mempunyai inti magnetik silinder yang dipasang di dalam kerangka logam yang di dalamnya terpasang *bed-plates*, *end shield* dan *terminal box*. Pada bagian akhir *end shield* terdapat *bearings* sebagai bantalan dari poros rotor (*shaft*). Inti magnetik stator dibentuk dari tumpukan logam tipis yang terlamina dengan ruang yang sama di dalamnya untuk membagi tiga gulungan stator.

Gulungan stator dibentuk dengan menghubungkan kumparan konduktor tembaga atau aluminium yang terisolasi dari dinding slot. Sumbu dari gulungan stator motor dengan jumlah kutub P terpisah

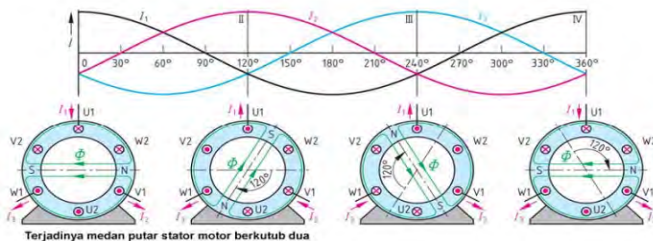
sebesar  $(2/P)(2\pi/3)$  *mechanical radians*, dengan masing-masing *belt* fasa mempunyai slot terminal yang sama. Ketiga gulungan stator dapat dihubungkan secara bintang maupun delta.

Rotor terdiri dari silinder inti besi yang dilaminasi dengan slot yang sama untuk membagi gulungan rotor. Terdapat dua jenis rotor yaitu rotor *wound* dan rotor sangkar tupai (*squirrel-cage*). Rotor jenis *wound*, mempunyai gulungan rotor seperti gulungan stator yang digulung pada silinder inti yang dilaminasi dengan ruang slot yang sama. Terminal dari gulungan tersebut dapat dibawa keluar melalui slip ring dan *brushes*. Untuk rotor jenis *squirrel-cage* terdiri dari inti besi yang pada ujung-ujungnya dihubungkan singkat seperti pada Gambar 2.1.

### 2.1.1. Konsep Dasar Motor Induksi

Jika kumparan stator dihubungkan ke sumber tegangan maka akan timbul medan magnet pada setiap kumparan stator. Karena kumparan stator terdiri dari 3 buah kumparan maka terdapat 3 medan magnet sinusoida yang *magnitude*-nya bernilai sama tetapi berbeda fasa sebesar 120 derajat. Tiga medan magnet yang berbeda fasa tersebut seolah-olah membentuk medan magnet yang berputar seperti terlihat pada Gambar 2.2. Besar fluks yang timbul pada setiap kumparan mempunyai nilai yang sama karena ketiga kumparan mempunyai arus yang sama.

Dengan adanya perubahan waktu, arah putaran medan magnet akan berubah sedangkan besar nilai medan magnet tetap karena arus, tegangan, fluks dan beban bernilai sama. Perubahan arah putaran medan magnet bergantung pada polaritas sumber yang masuk ke dalam kumparan. Apabila sumber positif maka arah medan magnet menuju ke kumparan, sebaliknya jika sumber negatif maka arah medan magnet keluar dari kumparan.



**Gambar 2.2** Bentuk Gelombang Sinusoida dan Timbulnya Medan Putar pada Stator Motor Induksi

Medan magnet yang ditimbulkan oleh stator pada celah udara akan memotong batang konduktor pada rotor. Menurut Hukum Faraday, ggl induksi akan timbul di dalam suatu konduktor apabila konduktor tersebut berada di dalam medan magnet. Sesuai dengan hukum Faraday tersebut maka pada batang konduktor akan timbul ggl induksi.

Selanjutnya menurut Hukum Lenz, ggl induksi selalu membangkitkan arus yang medan magnetnya berlawanan dengan perubahan fluks. Karena batang konduktor pada rotor dihubungkan singkat pada ujung-ujungnya maka ggl induksi pada rotor akan menimbulkan arus pada rangkaian tertutup pada batang konduktor tersebut. Sesuai dengan hukum Lorentz, bahwa jika ada arus yang mengalir di dalam suatu medan magnet maka akan timbul gaya yang searah dengan medan putar. Gaya yang timbul inilah yang disebut dengan Torsi elektromagnetik yang menggerakkan rotor.

### 2.1.2. Slip

Slip merupakan perbedaan antara kecepatan putaran rotor dengan kecepatan sinkron. Kecepatan *steady state* rotor harus selalu sedikit lebih rendah daripada kecepatan sinkron untuk menjaga pembangkitan torsi dengan *magnitude* yang dikehendaki. Persamaan 2.1 menunjukkan persamaan slip.

$$s = \frac{\Delta n}{n_s} = \frac{\Delta \omega}{\omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (2.1)$$

di mana,

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}; \quad n_s = \frac{60f}{P} \quad (2.2)$$

Slip operasi nominal bernilai sekitar 5%. Jika kecepatan rotor sama dengan kecepatan sinkron ( $\Delta n=0$ ), arus rotor akan turun menjadi nol sehingga torsi akan hilang dan rotor tidak berada tetap pada kecepatan sinkron dan mesin melambat dengan kecepatan yang lebih rendah.

## 2.2. Model Dinamik Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa mempunyai performa dinamik yang kompleks yang disebabkan oleh pergerakan kumparan rotor yang

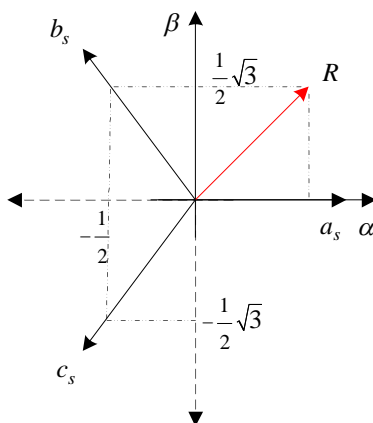
mengikuti pergerakan medan magnet yang dihasilkan kumparan stator sehingga timbul *coupling effect*[1]. Untuk memudahkan di dalam analisa motor induksi tiga fasa maka digunakan model dinamik d-q yang menggambarkan motor induksi tiga fasa dalam koordinat 2 fasa.

### 2.2.1. Transformasi Koordinat

Transformasi yang digunakan untuk mengubah koordinat motor induksi dari 3 fasa ke dalam koordinat 2 fasa. Terdapat dua buah koordinat 2 fasa yaitu koordinat stasioner dan koordinat *synchronously rotating* (dq).

#### a. Transformasi Clarke

Transformasi Clarke ialah Transformasi dari koordinat 3 fasa ke koordinat stasioner 2 fasa ( $\alpha\beta$ ). Sumbu  $\alpha$  seperti terlihat pada Gambar 2.3 berhimpitan dengan sumbu  $a_s$  dan sumbu  $\beta$  tertinggal dari sumbu  $\alpha$  sebesar  $\pi/2$  [5]. Sehingga resultan vektor ( $R$ ) dari transformasi tersebut dapat diperoleh.



**Gambar 2.3** Transformasi Clarke

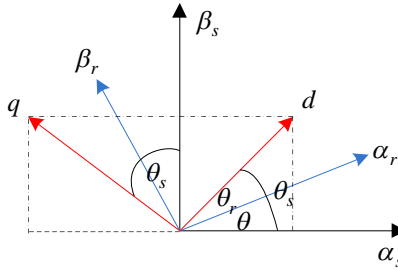
Persamaan 2.3 menunjukkan persamaan transformasi 3 fasa ke koordinat stasioner 2 fasa sedangkan Persamaan 2.4 menunjukkan matriks transformasinya. Variabel X dapat berupa nilai tegangan, arus dan fluks stator.

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = T_{23} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$T_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

b. Transformasi Park

Transformasi Park digunakan untuk mengubah besaran-besaran stator ke dalam koordinat *synchronously rotating frame* (dq) yang tetap pada rotor [1]. Gambar 2.4 menunjukkan gambar transformasi Park.



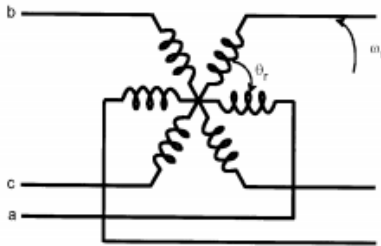
**Gambar 2.4** Transformasi Park

Persamaan 2.5 menunjukkan persamaan transformasi Park.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

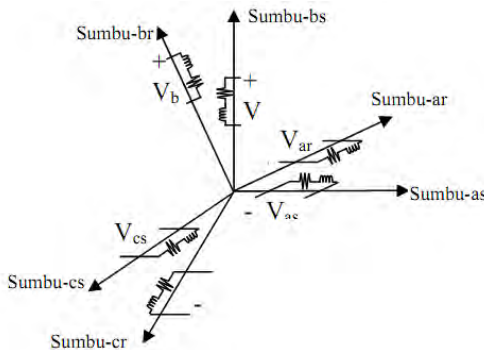
### 2.2.2. Persamaan Dinamik Motor Induksi 3 phasa

Dalam analisa motor induksi digunakan pemodelan dinamik dari motor induksi karena motor induksi 3 phasa mempunyai performa dinamik yang kompleks yaitu adanya *coupling effect* pada belitan stator dan belitan rotor seperti Gambar 2.5[1].



**Gambar 2.5** *Coupling Effect* Pada Belitan Stator Dan Rotor

Sesuai hukum Faraday maka dapat diperoleh persamaan stator dan rotor seperti Persamaan 2.6 dan Persamaan 2.7 dari Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Kumparan Stator Dan Rotor Motor Induksi Tiga Fasa Pada Koordinat abc

$$[V_{abcs}] = R_s [i_{abcs}] + \frac{d}{dt} [\psi_{abcr}] \quad (2.6)$$

$$[V_{abcr}] = R_r [i_{abcr}] + \frac{d}{dt} [\psi_{abcr}] = 0 \quad (2.7)$$

Perubahan fluks yang terjadi pada motor induksi timbul karena adanya interaksi antara fluks pada kumparan stator dan kumparan rotor. Perubahan fluks tersebut menimbulkan induktansi pada kumparan tersebut dan induktansi mutual antara kumparan stator dan kumparan rotor. Berdasarkan hal tersebut maka dapat diperoleh persamaan fluks motor induksi seperti pada Persamaan 2.8.

$$\begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \\ \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s & m_1 & m_2 & m_3 \\ m_s & l_s & m_s & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_s & m_s & l_s & m_3 & m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & l_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & m_r & l_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

di mana,

$$\begin{aligned} m_1 &= m_{sr} \cos \theta \\ m_2 &= m_{sr} \cos (\theta-120) \\ m_3 &= m_{sr} \cos (\theta+120) \end{aligned}$$

### 2.2.2.1. Stationary Reference Frame

Pada *stationary reference frame*, semua variabel pada stator maupun rotor diubah ke dalam variabel stasioner (*frame*  $\alpha\beta$ ) dengan Persamaan 2.9 dan Persamaan 2.10.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha\beta s} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{\alpha\beta s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{\alpha\beta s} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} i_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Persamaan 2.11 menunjukkan persamaan fluks dalam *stationary reference frame*.

$$\begin{bmatrix} \psi_{abcs} \\ \psi_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M \cos \theta & M(-\sin \theta) \\ 0 & L_s & M \sin \theta & M \cos \theta \\ M \cos \theta & M(-\sin \theta) & L_r & 0 \\ M \sin \theta & M \cos \theta & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha\beta s} \\ i_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

### 2.2.2.2. Synchronously Rotating Frame

Pada *synchronously rotating frame*, variabel yang telah diperoleh pada *stationary reference frame* diubah ke dalam *synchronously rotating frame* dengan Persamaan 2.12 dan Persamaan 2.13.



$$\begin{bmatrix} V_{dqs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{dqs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \theta_s P\left(\frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} \psi_{dqs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{dqs} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} V_{dqr} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{dqr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \theta_r P\left(\frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} \psi_{dqr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{dqr} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Persamaan 2.14 Menunjukkan persamaan fluks dalam *synchronously rotating frame*.

$$\begin{bmatrix} \frac{\psi_{dqs}}{\psi_{dqr}} \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{cc|cc} L_s & 0 & M & M \\ 0 & L_s & M & M \\ \hline M & M & L_r & 0 \\ M & M & 0 & L_r \end{array} \right] \begin{bmatrix} i_{dqs} \\ i_{dqr} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Persamaan 2.15 – 2.18 menunjukkan persamaan Torsi yang dibangkitkan pada *synchronously rotating frame*.

$$T_e = P (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (2.15)$$

$$= P (\psi_{dr} i_{qr} - \psi_{qr} i_{dr}) \quad (2.16)$$

$$= P M (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (2.17)$$

$$= P \frac{M}{L_r} (\psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}) \quad (2.18)$$

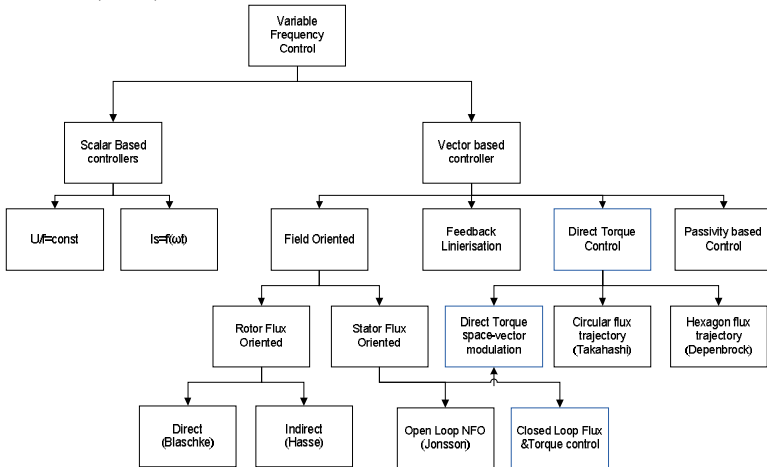
Kecepatan putaran motor induksi ditentukan oleh perbedaan torsi elektromagnetik dan torsi beban (termasuk torsi gesekan) yang bekerja pada inersia gabungan beban dan motor ( $J_{eq}$ )[6]. Persamaan 2.20 merupakan persamaan kecepatan putaran rotor dalam *radians per second*.

$$\frac{d}{dt} \omega_{mech} = \frac{T_{em} - T_L}{J_{eq}} \quad (2.19)$$

$$\omega_m = \frac{p}{2} \omega_{mech} \quad (2.20)$$

### 2.3. Metode Direct Torque Control (DTC)

Metode pengaturan motor induksi dapat dibagi menjadi *scalar* dan *vector control*. Gambar 2.7 merupakan klasifikasi pengaturan motor induksi. Salah satu metode vektor kontrol ialah metode *Direct Torque Control* (DTC).



**Gambar 2.7** Klasifikasi Pengaturan Motor Induksi

Skema *Direct Torque Control* (DTC) terdiri dari dua pengaturan histeresis. Pengaturan fluks stator untuk menentukan lama waktu vektor tegangan yang aktif, yang menggerakkan fluks stator sepanjang lintasan referensi dan pengaturan torsi untuk menentukan lama waktu vektor tegangan nol, yang menahan torsi motor berada pada batas toleransi yang telah ditentukan oleh histeresis torsi [2].

Gambar 2.8 merepresentasikan blok diagram *Direct Torque Control* dimana pada blok DTC terdapat beberapa subblok diantaranya blok estimator, blok komparator, blok *switching table* dan blok *inverter*.



$$\psi_{\alpha} = \int (V_{\alpha} - i_{\alpha} \cdot R_s) dt \quad (2.25)$$

$$\psi_{\beta} = \int (V_{\beta} - i_{\beta} \cdot R_s) dt \quad (2.26)$$

dapat dinyatakan juga seperti Persamaan 2.27.

$$\frac{d\psi_s}{dt} = V_s - i_s \cdot R_s \quad (2.27)$$

Jika  $R_s$  nilainya sangat kecil, maka  $R_s \cdot i_s \approx 0$  dan Persamaan 2.27 menjadi Persamaan 2.28.

$$\frac{d\psi_s}{dt} = V_s \quad (2.28)$$

$$\Delta\psi_s = V_s \Delta t \quad (2.29)$$

di mana  $\Delta t$  adalah periode sampling (detik).

Persamaan 2.30 dan 2.31 menunjukkan persamaan untuk memperoleh nilai *magnitude* dan sudut fluks stator.

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2} \quad (2.30)$$

$$\alpha = \angle \psi_s = \tan^{-1} \frac{\psi_{\alpha}}{\psi_{\beta}} \quad (2.31)$$

Nilai torsi estimasi diperoleh dari Persamaan 2.32.

$$T_e = \frac{3}{4} P \left( \psi_{\beta} i_{\alpha} - \psi_{\alpha} i_{\beta} \right) \quad (2.32)$$

### 2.3.2. Komparator pada DTC [7]

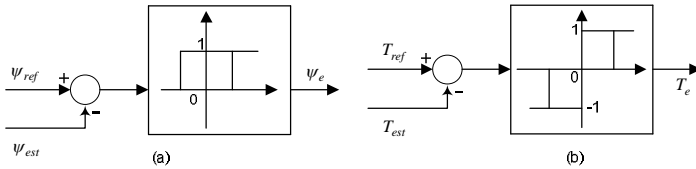
Pada metode DTC, kontroler yang digunakan dalam mengatur kesalahan fluks dan torsi agar sesuai dengan fluks referensi dan torsi referensi berturut – turut menggunakan *two-level* dan *three-level* histeresis. Komparator ini digunakan untuk memperoleh nilai kesalahan

fluks dan torsi pada daerah histeresisnya. Pada kesalahan fluks dihasilkan dua nilai histeresis, yaitu -1 atau 1 dan pada kesalahan torsi dihasilkan tiga nilai histeresis yaitu -1, 0, 1. Nilai kesalahan fluks dan torsi didapat dari Persamaan 2.33 dan Persamaan 2.34.

$$\Delta T_e = T_{ref} - T_{est} \quad (2.33)$$

$$\Delta \psi^s = \psi_{ref}^s - \psi_{est}^s \quad (2.34)$$

Nilai fluks akan dibandingkan dengan fluks referensi untuk memperoleh fluks histeresis seperti pada Gambar 2.9(a). Sedangkan nilai torsi elektromagnetik yang dihasilkan dibandingkan dengan torsi elektromagnetik referensi seperti Gambar 2.9(b). Fluks dan torsi keluaran komparator nilainya dapat berubah maupun tetap bergantung pada selisih torsi dan fluks yang dihasilkan dengan torsi dan fluks referensi.



**Gambar 2.9** (a) Fluks histeresis komparator, (b) Torsi histeresis komparator

Salah satu faktor penting dalam operasi ini adalah daerah histeresis dari fluks dan torsi komparator. Komparator memberikan bentuk gelombang fluks dan torsi yang lebih baik dan juga meningkatkan frekuensi *switching inverter*. Kombinasi dari keluaran fluks dan torsi komparator dengan nilai sudut fluks stator kemudian diterapkan pada aturan yang ada pada *switching table*. Aturan tersebut yang akan menentukan vektor tegangan yang akan mengaktifkan *switching* pada *inverter*.

### 2.3.3. *Switching Table* [7]

Sinyal masukkan pada *switching table* diperoleh berdasarkan nilai dari fluks dan torsi histeresis, serta nilai dari sektor fluks stator

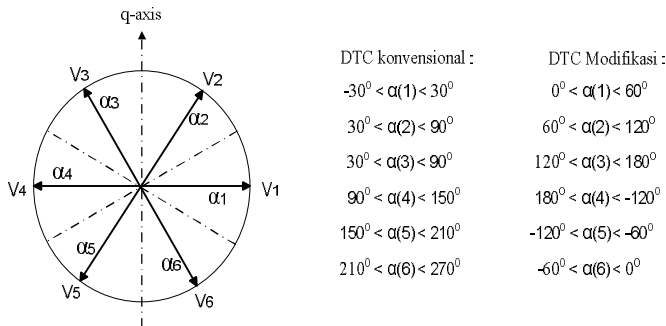
yang dinyatakan dengan  $\alpha$ . Algoritma DTC memilih vektor tegangan *inverter* untuk diterapkan pada motor induksi sebagai sumber tegangan. Aturan pemilihan tegangan pada *switching table* seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1. Keluaran dari *switching table* mengatur perangkat *switching* yang aktif pada *inverter*. Gambar 2.10 menunjukkan hubungan antara vektor tegangan *inverter* dengan sektor dari fluks stator yang berlaku pada metode DTC konvensional dan modifikasi. Adapun nilai sektor fluks stator diperoleh dari Persamaan 2.33.

$$\alpha = \angle \psi_s = \tan^{-1} \frac{\psi_{qs}}{\psi_{ds}} \quad (2.33)$$

**Tabel 2.1** *Switching Table* dari vektor tegangan *inverter*

$d\psi$	$dT_e$	$\alpha(1)$ sektor 1	$\alpha(2)$ sektor 2	$\alpha(3)$ sektor 3	$\alpha(4)$ sektor 4	$\alpha(1)$ sektor 5	$\alpha(1)$ sektor 6
<b>-1</b>	-1	$\bar{V}5$	$\bar{V}6$	$\bar{V}1$	$\bar{V}2$	$\bar{V}3$	$\bar{V}4$
	0	$\bar{V}0$	$\bar{V}7$	$\bar{V}0$	$\bar{V}7$	$\bar{V}0$	$\bar{V}7$
	1	$\bar{V}3$	$\bar{V}4$	$\bar{V}5$	$\bar{V}6$	$\bar{V}1$	$\bar{V}2$
<b>1</b>	-1	$\bar{V}6$	$\bar{V}1$	$\bar{V}2$	$\bar{V}3$	$\bar{V}4$	$\bar{V}5$
	0	$\bar{V}7$	$\bar{V}0$	$\bar{V}7$	$\bar{V}0$	$\bar{V}7$	$\bar{V}0$
	1	$\bar{V}2$	$\bar{V}3$	$\bar{V}4$	$\bar{V}5$	$\bar{V}6$	$\bar{V}1$

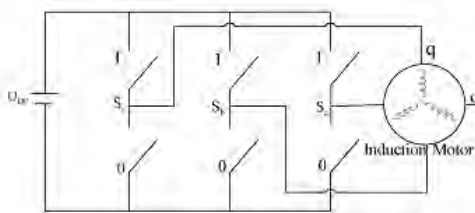
Vektor tegangan aktif atau bernilai bukan nol terdiri dari  $\bar{V}1$  (100);  $\bar{V}2$  (110);  $\bar{V}3$  (010);  $\bar{V}4$  (011);  $\bar{V}5$  (001);  $\bar{V}6$  (101). Sedangkan vektor tegangan bernilai nol adadalah  $\bar{V}0$  (000);  $\bar{V}7$  (111). Pada DTC konvensional, *state inverter* pada  $V_1$  dan  $V_4$  tidak digunakan karena nilai torsi tidak jelas apakah naik atau turun, bergantung pada posisi sektornya apakah berada pada posisi  $30^\circ$  pertama atau yang kedua. Sedangkan pada DTC modifikasi *state inverter* yang tidak digunakan adalah  $V_3$  dan  $V_6$  karena pada  $V_3$  dan  $V_6$  nilai dari fluks statornya yang ambigu. Hal tersebut dianggap sebagai suatu keuntungan dalam mengatur torsi menggunakan metode DTC modifikasi.



**Gambar 2.10** Vektor tegangan *inverter* dan sektor *switching* fluks stator pada DTC konvensional dan modifikasi

#### 2.3.4. *Inverter* [8]

Rangkaian *inverter* merupakan rangkaian yang berfungsi untuk merubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Ada dua jenis *inverter* berdasarkan jenis sumber dayanya dan topologi dari rangkaian sumbernya, yaitu *Voltage Source Inverter* (VSI) dan *Current Source Inverter* (CSI). Topologi dari *Three Phase, Two Level Voltage Source Inverter* ditunjukkan pada Gambar 2.11. Dari topologi tersebut terdapat 8 vektor tegangan yang terdiri dari 6 vektor tegangan aktif dan 2 vektor tegangan nol. Vektor tegangan tersebut dapat diperoleh dari kombinasi pada kondisi *switching inverter* ( $S_a$ ,  $S_b$  dan  $S_c$ ).



**Gambar 2.11** Topologi *three phase, two level VSI*

Pada saat bagian atas dari *switch inverter* pada kondisi ON, maka *switching*-nya bernilai 1 dan saat *switch inverter* bawah ON, maka *switching*-nya bernilai 0. *Switch* bagian atas dan bawah tidak dapat ON bersamaan karena akan terjadi hubung singkat.

Dari kondisi-kondisi perubahan saklar pada *inverter*, maka dapat disusun nilai *state* tegangan tiap vektor seperti pada Tabel 2.2. Tegangan keluaran *inverter* fasa ke netral diperoleh dari tegangan per fasa seperti Persamaan 2.34.

$$V_s^s = \frac{2V_{dc}}{3} \left( s_{a+e} j^{\frac{2\pi}{3}} s_{b+e} j^{\frac{4\pi}{3}} s_c \right) \quad (2.34)$$

dalam bentuk matrik seperti Persamaan 2.35

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

**Tabel 2.2** Nilai tegangan vektor pada *inverter*

Vektor Tegangan	Kondisi Saklar			Tegangan <i>Line to Netral</i>			Tegangan <i>Line to Line</i>		
	S <sub>a</sub>	S <sub>b</sub>	S <sub>c</sub>	V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>	V <sub>ab</sub>	V <sub>bc</sub>	V <sub>ca</sub>
V0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
V2	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	-1	1
V3	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
V4	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
V5	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
V6	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
V7	1	1	1	0	0	0	0	0	0



## 2.4 Logika Fuzzy [9]

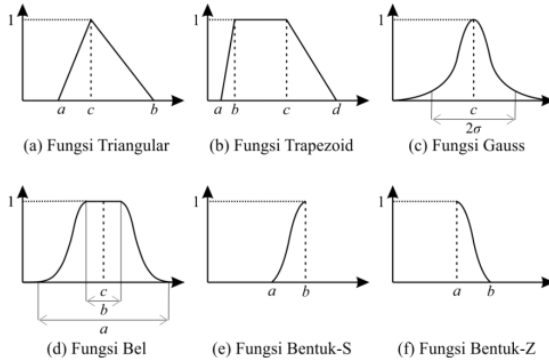
Konsep logika *fuzzy* berawal dari teori *fuzzy set* sebagai salah satu pendekatan untuk menyelesaikan permasalahan yang tidak memiliki ketentuan yang pasti. Teori tersebut dikembangkan oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965 di University of California – Barkeley. Dalam jurnalnya, Zadeh memperkenalkan konsep teori himpunan baru yang dinamakan *fuzzy set*. Konsep logika *fuzzy* menggantikan konsep “benar-salah” dari logika *boolean* menjadi derajat tingkat kebenaran. Teori *fuzzy* menyatakan keanggotaan suatu objek ke dalam fungsi derajat keanggotaan (*membership function*). Hal tersebut memungkinkan keanggotaan suatu objek dapat dinyatakan pada semua bilangan riil antara 0 sampai 1. Oleh karena itu, konsep *fuzzy* tersebut sesuai dengan pola pikir manusia yang cenderung menilai suatu objek secara samar.

### 2.4.1 Himpunan Fuzzy (*Fuzzy Set*)

Himpunan *Fuzzy* merupakan suatu himpunan yang beranggotakan sejumlah istilah dalam pengertian bahasa yang menyatakan level kualitatif dari semesta pembicaraan. Misalnya pengukuran kecepatan putaran motor dapat diterjemahkan ke dalam beberapa istilah bahasa yang menyatakan level kualitatif dari kecepatan putaran motor. Sehingga apabila semesta pembicaraan berupa kecepatan putaran motor, maka dapat dibuat suatu himpunan *fuzzy* yaitu “Sangat Lambat”, “Lambat”, “Sedang”, “Cepat”, “Sangat Cepat”.

### 2.4.2 Fungsi Keanggotaan (*Membership function*)

Fungsi keanggotaan merupakan suatu fungsi yang didefinisikan untuk suatu anggota himpunan *fuzzy* yang menggambarkan derajat kebenaran suatu kejadian dalam semesta pembicaraan. Fungsi keanggotaan dinyatakan dalam tingkat keanggotaan dengan nilai antara 0 s/d 1. Beberapa fungsi keanggotaan yang biasa digunakan untuk merepresentasikan nilai keanggotaan dari suatu himpunan *fuzzy* diantaranya seperti Gambar 2.12 yang menunjukkan bentuk-bentuk dari fungsi keanggotaan tersebut.



**Gambar 2.12** Bentuk-Bentuk *Membership Function*

Persamaan dari masing-masing *membership function* dapat dinyatakan seperti Persamaan 2.36 - 2.39.

$$Segitiga : \mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (2.36)$$

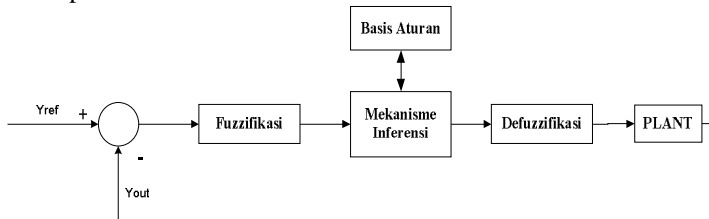
$$Bell-shaped : \mu_A(x) = \exp \left[ - \left( \frac{u_i - x}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.37)$$

$$Trapezium : \mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-b} & x \geq c \end{cases} \quad (2.38)$$

$$\text{Singleton} : \mu_A(x)=1, \quad (2.39)$$

### 2.4.3 Kontroler Logika Fuzzy [10]

Kontroler logika *fuzzy* merupakan suatu kontroler yang proses perhitungan sinyal kontrolnya melalui operasi himpunan *fuzzy* meliputi proses *fuzzifikasi*, relasi *fuzzy*, inferensi *fuzzy* serta *defuzzifikasi* seperti terlihat pada Gambar 2.13.

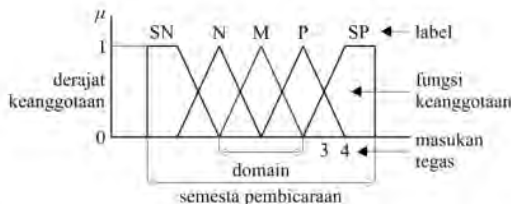


**Gambar 2.13** Struktur Kontroler *Fuzzy*

Proses di dalam himpunan *fuzzy* pada kontroler *fuzzy* antara lain sebagai berikut :

#### a. *Fuzzifikasi*

*Fuzzifikasi* merupakan proses transformasi nilai real (nilai bukan *fuzzy*) menjadi nilai suatu himpunan *fuzzy* yang dinyatakan dalam derajat keanggotaan yang didefinisikan. Struktur fungsi keanggotaan *fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 2.14. Derajat keanggotaan adalah derajat dari masukan tegas pada sebuah fungsi keanggotaan, memiliki nilai 0 s/d 1. Fungsi keanggotaan mendefinisikan nilai *fuzzy* dengan melakukan pemetaan nilai tegas berdasarkan daerahnya untuk diasosiasikan dengan derajat keanggotaan.



**Gambar 2.14** Struktur fungsi keanggotaan *fuzzy*

Masukkan tegas pada umumnya merupakan hasil pengukuran parameter eksternal dari sistem kontrol. Label merupakan deskripsi nama untuk menunjukkan suatu fungsi keanggotaan *fuzzy* yang memiliki domain (lebar fungsi keanggotaan *fuzzy*) tertentu. Semesta pembicaraan memiliki jarak yang mencakup seluruh masukkan tegas yang mungkin ada. Bentuk fungsi keanggotaan harus mewaliki variabel masukkan tegas, namun bentuk yang digunakan dibatasi oleh kemampuan *tool* dalam melakukan perhitungan. Bentuk fungsi yang rumit membutuhkan persamaan fungsi yang lebih kompleks.

b. Basis Aturan

Basis aturan merupakan deskripsi linguistik terhadap variabel input dan output. Penentuan basis aturan yang dipakai dalam mengontrol suatu *plant* dapat melalui metode heuristik maupun deterministik. Metode heuristik didasarkan pada pengetahuan terhadap *plant* dan perilaku dari *plant* yang akan dikontrol. Sedangkan metode deterministik diperoleh melalui identifikasi struktur dan parameter dari aturan kontrol. Pemetaan input dan output pada sistem *fuzzy* direpresentasikan dalam Persamaan 2.40.

$$\textbf{If premis Then konsekuen} \quad (2.40)$$

Pada kontroler *fuzzy*, input kontroler direpresentasikan dalam premis dan output kontroler direpresentasikan dalam konsekuen. Jumlah basis aturan dari suatu sistem *fuzzy* ditentukan dari jumlah variabel pada input dan jumlah *membership function* pada variabel masukan, dirumuskan dalam Persamaan 2.41.

$$\prod_{i=1}^n N_i = N_1 \times N_2 \times \dots \times N_n \quad (2.41)$$

Dimana  $N_i$  merupakan jumlah *membership function* pada variabel input  $i$ . Sebagai contoh apabila variabel input pertama memiliki tiga *membership function* dan variabel input kedua memiliki tiga *membership function*, maka jumlah basis aturan adalah  $3 \times 3 = 9$  aturan.

c. Mekanisme inferensi

Mekanisme inferensi pada kontroler *fuzzy* merupakan mekanisme operasi matematika yang dilakukan sesuai dengan premis yang

diberikan. Pada basis aturan terdapat dua operasi matematika yang dapat dilakukan yaitu *AND* dan *OR*.

Terdapat beberapa tipe mekanisme inferensi *fuzzy* antara lain Mamdani, Larsent dan Takagi sugeno. Perbedaan dari metode ini terletak pada pengambilan kesimpulan logika *fuzzy*. Pada metode Mamdani maupun Larsent, kesimpulan logika *fuzzy* berupa derajat keanggotaan sehingga dalam menyimpulkan suatu logika *fuzzy* dibutuhkan proses *defuzzifikasi*. Sedangkan pada tipe Takagi Sugeno, kesimpulan logika *fuzzy* berupa suatu persamaan sehingga tidak diperlukan proses *defuzzifikasi*. Kelebihan pada logika *fuzzy* tipe Mamdani dan Larsent lebih sederhana, akan tetapi diperlukan kemampuan untuk mengetahui karakteristik *plant* untuk menentukan batasan keluaran kontroler. Pada tipe Takagi-Sugeno tidak diperlukan pengetahuan mengenai karakteristik dari *plant* akan tetapi diperlukan perhitungan yang lebih rumit untuk persamaan pada bagian konsekuen.

#### d. Defuzzifikasi

*Defuzzifikasi* adalah suatu proses mentransformasikan harga *fuzzy* hasil dari inferensi *fuzzy* ke dalam harga bukan *fuzzy* atau harga aktual. Beberapa metode dalam proses *defuzzifikasi* yaitu *Center of Area*, *Mean of Maxima*, *weighted sum* dan lainnya.

##### *Center of Area*

Metode *center of area* digunakan untuk menentukan nilai titik tengah area yang merupakan titik pusat massa dari kombinasi fungsi-fungsi keanggotaan. Secara umum, persamaan untuk metode *Center of Area* ditunjukkan dengan Persamaan 2.42.

$$U_0 = \frac{\sum_{k=1}^m u_k(T) \cdot \mu_u(u_k(T))}{\sum_{k=1}^m \mu_k(u_k(T))}, \forall u \in U(T) \quad (2.42)$$

##### *Mean of Maxima*

Metode *mean of maxima* mengambil semua nilai tiap fungsi keanggotaan dengan derajat keanggotaan maksimum dan menghitung rata-rata dari nilai-nilai tersebut sebagai keluaran tegas. Persamaan 2.3 menunjukkan persamaan umum metode tersebut.

$$U_o = \frac{\sum_n \max(\mu_A^n) \cdot y_n}{\sum_n \max(\mu_A^n)} \quad (2.43)$$

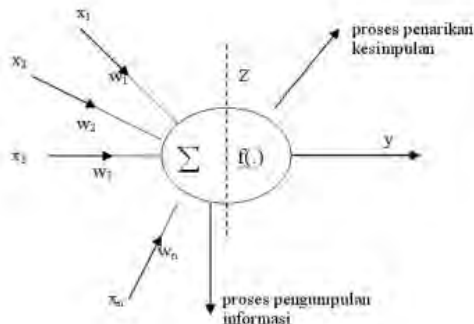
#### *Weigthed sum*

Metode *weigthed sum* merupakan metode *defuzzifikasi* dengan fungsi keanggotaan berupa fungsi *singleton*. Persamaan 2.44 menunjukkan persamaan *defuzzifikasi* fungsi *singleton*.

$$U_o = \frac{\sum_i \mu_A^i s_i}{\sum_i \mu_A^i} \quad (2.44)$$

## 2.5 Jaringan Saraf Tiruan [9]

Jaringan saraf tiruan adalah suatu metode komputasi yang merupakan bentuk penyederhanaan dari jaringan sistem saraf biologis yang dinyatakan ke dalam formulasi matematik jaringan simbolik. Gambar 2.15 menunjukkan struktur model jaringan saraf tiruan. Jaringan saraf tiruan dapat digunakan untuk belajar dan menghasilkan aturan atau operasi dari beberapa contoh atau masukkan dan membuat prediksi tentang kemungkinan keluaran yang akan muncul atau menyimpan karakteristik masukkan yang diberikan kepada jaringan saraf tiruan.

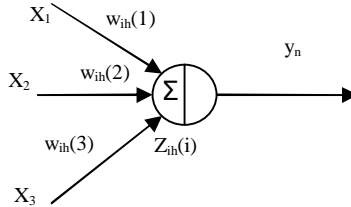


**Gambar 2.15** Struktur model Jaringan Saraf Tiruan

Pada jaringan syaraf tiruan terdapat dua formulasi yaitu formulasi *forward* dan formulasi *backward*.

a. Formulasi *Forward*

Formulasi *forward* digunakan untuk menghitung keluran dari setiap *neuron* pada jaringan saraf tiruan.



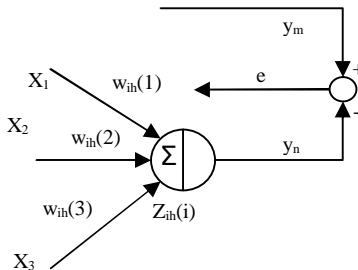
**Gambar 2.16** Struktur formulasi *forward*

Gambar 2.16 menunjukkan struktur formulasi *forward* pada jaringan saraf tiruan yang terdiri dari masukan, bobot, fungsi aktivasi dan keluaran. Persamaan 2.45 dan 2.46 merepresentasikan nilai fungsi aktivasi dan keluaran dari formulasi *forward*.

$$z_{ih}(i) = \sum_{i=1}^n w_{ih}(i,j) \times x(i) \quad (2.45)$$

$$y_{ih}(i) = \lambda \times z_{ih}(i) \quad (2.46)$$

b. Formulasi *Backward*



**Gambar 2.17** Struktur formulasi *backward*

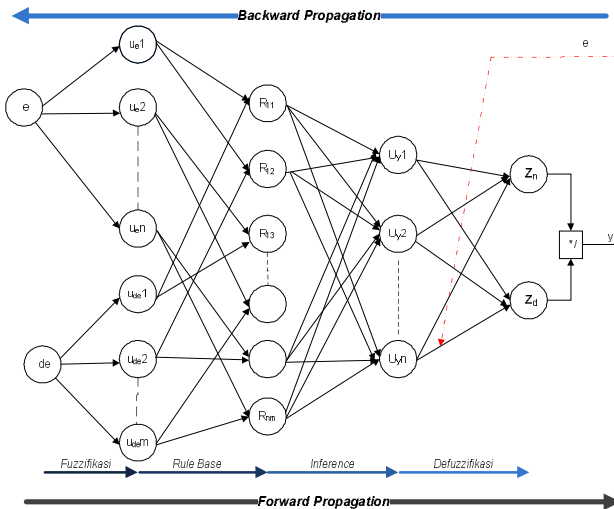
Formulasi *backward* digunakan untuk merevisi bobot dari nilai *error* yang diperoleh dari proses adaptasi jaringan terhadap keluaran model yang diinginkan. Setiap ada *error* baru, jaringan dapat belajar dari *error* tersebut dengan merevisi nilai bobot untuk menyesuaikan karakter nilai. Gambar 2.17 menunjukkan struktur formulasi *backward* pada jaringan saraf tiruan. Persamaan 2.47 dan Persamaan 2.48 menunjukkan formulasi revisi bobot pada proses *backward*.

$$e = y_m - y_n \quad (2.47)$$

$$w^B = w^L + \alpha \times e \times f'(z) \times x(i) \quad (2.48)$$

## 2.6 Kontroler Neuro Fuzzy [11]

Sistem hibrida yang menggabungkan logika *fuzzy*, jaringan saraf tiruan, algoritma genetika, dan kecerdasan buatan lainnya sudah banyak dikembangkan untuk menyelesaikan berbagai masalah yang berkaitan dengan optimalisasi. Konsep hibrida dikembangkan karena pada metode kecerdasan buatan ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, sehingga dengan konsep hibrida akan diperoleh suatu metode yang lebih baik dalam menyelesaikan permasalahan optimasi.



**Gambar 2.18** Struktur Kontroler Neuro Fuzzy dengan 2 masukan



Kontroler NF merupakan sistem hibrida yang menggabungkan konsep logika *fuzzy* dengan jaringan saraf tiruan (JST). Logika *fuzzy* memiliki kelebihan dalam pengambilan keputusan, sedangkan JST memiliki kelebihan dalam adaptasi melalui kemampuan pembelajaran yang dimilikinya. Kekurangan logika *fuzzy* dalam hal penentuan parameter yang sifatnya intuitif dapat diatasi dengan JST. Pada kontroler NF, logika *fuzzy* akan direpresentasikan dalam JST yang memungkinkan terjadinya pembelajaran di dalamnya dan akan terjadi perubahan bobot untuk mengubah parameter pada logika *fuzzy*.

Gambar 2.18 menunjukkan skema atau model dari kontroler *Neuro Fuzzy*. Terdapat beberapa skema atau struktur *Neuro Fuzzy*, seperti *Neuro Fuzzy Mamdani* atau *Larsent*, *Neuro Fuzzy Takagi-Sugeno* (ANFIS / *Artificial Neuro Fuzzy Inference System*), *Neuro Fuzzy Biner* (Multi input) atau *Neuro Fuzzy* formulasi Wang. Dari Gambar 2.18 dapat diketahui bahwa dalam struktur *Neuro Fuzzy* terdapat 2 tahapan yaitu *forward propagation* dan *backward propagation*.

### 2.6.1 Tahapan *Forward Propagation*

Tahapan *Forward Propagation* merupakan tahapan perhitungan sistem *fuzzy* yang direpresentasikan ke dalam beberapa layer seperti dalam *neural network*. Dalam tiap layer tersebut melaksanakan fungsi-fungsi dalam sistem *fuzzy* seperti *fuzzifikasi*, *inference* dan *defuzzifikasi*.

#### Lapisan 1:

Lapisan pertama merupakan *node* masukan yang mengirim sinyal masukan ke lapisan berikutnya. Pada lapisan ini nilai keluaran *node* sama dengan nilai masukannya seperti Persamaan 2.49.

$$O_{1,1}=e, O_{2,1}=de \quad (2.49)$$

#### Lapisan 2 :

Lapisan kedua berfungsi sebagai *membership function* untuk mengekspresikan nilai linguistik dari variabel linguistik masukan. Lapisan ini menjalankan proses *fuzzifikasi*, misalnya jika digunakan fungsi segitiga maka persamaan dalam *node* ini seperti pada Persamaan 2.51 dengan masukan *node* dari Persamaan 2.50.

$$x_{i,2} = \begin{cases} O_{1,1} & ; \text{untuk } i=1,2,\dots,n \\ O_{2,1} & ; \text{untuk } i=1,2,\dots,m \end{cases} \quad (2.50)$$

$$O_{i,2} = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x_{i,2}-a}{b-a} & a < x < b \\ \frac{c-x_{i,2}}{c-b} & b < x < c \\ 0 & x < c \end{cases} ; \text{ untuk } i = 1,2,\dots,n+m \quad (2.51)$$

### Lapisan 3 :

Lapisan ketiga digunakan untuk basis aturan (*rule-base*) fuzzy, setiap *node* pada lapisan mempunyai masukan dari dua nilai pada lapisan kedua. Operasi pada lapisan ini berbeda-beda tergantung dari struktur *Neuro Fuzzy* yang digunakan. Misalnya jika digunakan struktur *Neuro Fuzzy* Mamdani maka digunakan operasi MIN sedangkan jika menggunakan *Neuro Fuzzy* Larsent digunakan operasi *product*. Persamaan 2.52 menunjukkan persamaan basis aturan (*rule-base*) pada struktur *Neuro Fuzzy* Larsent.

$$R_{i,3} = O_{n,2} \times O_{m,2} ; \text{ untuk } i = 1,2,\dots,n \times m \quad (2.52)$$

### Lapisan 4 :

Lapisan keempat menjalankan proses inferensi sehingga keluaran pada *node* ini diperoleh dari operasi inferensi. Sama halnya pada lapisan 3, pada lapisan ini dilakukan operasi inferensi yang bergantung pada struktur *Neuro Fuzzy* yang digunakan. Misalnya jika digunakan struktur *Neuro Fuzzy* Mamdani maka digunakan operasi MAX sedangkan jika menggunakan *Neuro Fuzzy* Larsent digunakan operasi jumlah. Persamaan 2.53 dan Persamaan 2.54 menunjukkan operasi jumlah pada struktur *Neuro Fuzzy* Larsent.

$$r_{i,4} = \sum_{j=1}^{n \times m} w_{ij} R_{(j,3)} ; \text{ untuk } i = 1,2,\dots,n \times m \quad (2.53)$$

$$O_{i,4} = \sum_{i=1}^n r_{i,4} ; \quad \text{untuk } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.54)$$

Pada struktur *Neuro Fuzzy Mamdani/Larsent* bobot  $w_{ij}$  bernilai satu karena pada struktur ini tidak terdapat revisi nilai bobot pada proses inferensi. Revisi bobot  $w_{ij}$  pada lapisan ini dilakukan apabila menggunakan struktur *Neuro Fuzzy Takagi-Sugeno*, yang mana revisi bobot digunakan untuk merevisi *rule-base fuzzy*.

#### **Lapisan 5 :**

Lapisan kelima merupakan lapisan yang menjalankan proses *defuzzikasi* untuk menghitung sinyal keluaran dari kontroler *Neuro Fuzzy*. Apabila digunakan fungsi *fuzzy singleton* maka Persamaan 2.55 menunjukkan persamaan dari fungsi *fuzzy singleton*. Dengan bobot adalah  $c_i$  yang merupakan nilai tengah dari fungsi keanggotaan sinyal keluaran.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \times Uy_i}{\sum_{i=1}^n Uy_i} \quad (2.55)$$

### **2.6.2 Tahapan Backward Propagation**

Pada kontroler *Neuro Fuzzy*, proses *backward* dilakukan untuk merevisi nilai tengah dari *membership function*. Proses tersebut terdapat pada struktur *Neuro Fuzzy Mamdani* atau *Larsent*. Proses *backward* hanya dilakukan satu kali yaitu untuk merevisi nilai tengah dari fungsi keanggotaan sinyal kontrol saja. Berbeda dengan struktur *Neuro Fuzzy Takagi-sugeno (ANFIS)*, proses *backward* dilakukan sampai ke proses inferensi. Jadi proses *backward* tidak hanya merevisi bobot sinyal kontrol tetapi juga merevisi *rule base* pada proses inferensi.

Persamaan 2.56 menunjukkan persamaan revisi nilai tengah pada struktur *Neuro Fuzzy Larsent*.

$$c_y^B(i) = c_y^L(i) + \alpha \times e_{num} \times 1 \times Uy(i) \quad (2.56)$$

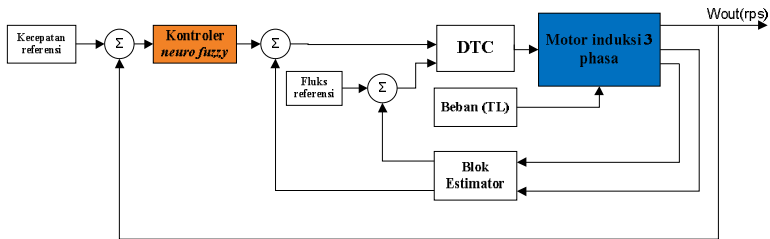
## BAB 3

### PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini membahas mengenai perancangan simulasi sistem mulai dari perancangan model motor induksi tiga fasa, perancangan *Direct Torque control* dan perancangan kontroler *Neuro Fuzzy*.

#### 3.1 Diagram Blok Sistem

Gambar 3.1 menunjukkan diagram blok keseluruhan dari pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan *Direct Torque Control* berbasis *Neuro Fuzzy*.



**Gambar 3.1** Diagram blok sistem

Pada diagram blok menunjukkan bahwa sistem terdiri dari beberapa bagian atau subsistem. Bagian Kecepatan referensi merupakan bagian untuk memasukkan kecepatan putaran motor yang diinginkan. Blok kontroler *Neuro Fuzzy* berisi struktur kontroler *Neuro Fuzzy*.

Blok DTC berisi kontrol histeresis torsi dan fluks untuk membandingkan nilai torsi dan fluks referensi dengan torsi dan fluks aktual untuk memperoleh kondisi *switching* pada *switching table* DTC. Keluaran dari *switching table* akan mengatur perangkat *switching* pada inverter untuk menghasilkan tegangan tiga fasa yang akan disuplai ke motor induksi tiga fasa.

Blok motor induksi tiga fasa berisi persamaan state dari model matematik motor induksi tiga fasa. Pada blok ini juga terdapat transformasi tegangan tiga fasa ke dua fasa serta keluaran dari blok ini terdiri arus, tegangan, torsi dan kecepatan mekanik motor dalam radian per *second*. Selanjutnya tegangan dan arus dari motor induksi akan masuk ke dalam blok estimator untuk mengestimasi nilai torsi dan

fluks aktual yang akan dibandingkan dengan nilai torsi dan fluks referensi.

Blok fluks referensi berisi nilai fluks referensi yang dibuat konstan sedangkan blok beban berisi nilai Torsi beban yang diaplikasikan ke motor induksi tiga fasa. Torsi beban diatur sesuai dengan batas torsi maksimal pada motor yang digunakan.

### 3.2 Perancangan Model Motor induksi 3 fasa

Model motor induksi pada perancangan tugas akhir ini diperoleh dari parameter – parameter fisik motor induksi. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk menghitung parameter motor induksi yang berubah terhadap waktu seperti tegangan, arus, torsi, fluks dan kecepatan. Nilai parameter dinamik tersebut diperoleh dari persamaan dinamik pada motor induksi. Pada tugas akhir ini, digunakan motor induksi tiga fasa 3 HP/24KW. Tabel 3.1 menunjukkan parameter dari motor induksi tersebut.

**Tabel 3.1** Parameter – parameter motor induksi 3 HP

No.	Nama	Nilai
1.	Tenaga Motor (HP)	3,0000
2.	Tegangan Motor (Line toLine) (Volt)	460,00
3.	Frekuensi (Hz)	60,000
4.	Jumlah pasang kutub	4,0000
5.	Tahanan Stator (Ohm)	1,7700
6.	Tahanan Rotor (Ohm)	1,3400
7.	Induktansi Stator (mH)	0,3826
8.	Induktansi Rotor (mH)	0,3808
9.	Induktansi Mutual (mH)	0,3687
10.	Momen Inersia (Kg.m <sup>2</sup> )	0,0250

Dari parameter daya dan momen inersia pada motor pada Tabel 3.1 dapat dicari beban nominal dari motor dengan Persamaan 3.1.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} J \omega^2 \\
 &= \frac{1}{2} \times 0.025 \cdot 120^2 = 180 \text{ Watt} \\
 P &= 2400 - 180 = 2220 \text{ Watt}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Daya 2220 Watt merupakan daya keluaran motor yang dapat memenuhi beban yang akan diberikan pada motor. Dengan daya tersebut dapat diperoleh beban nominal dengan Persamaan 3.2

$$\begin{aligned}
 P &= T_{nom} \times \omega \\
 T_{nom} &= \frac{P}{\omega} \\
 &= \frac{2220}{120} = 18,5
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Torsi diatas merupakan torsi nominal dari motor tersebut sehingga dapat diperoleh torsi maksimal yaitu 20-25% dari torsi nominal.

$$\begin{aligned}
 T &= 20\% \times 18,5 = 3,7 \text{ Nm} \\
 T_{max} &= 18,5 + 3,7 = 22,2 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

### 3.2.1 Persamaan motor induksi

Nilai-nilai parameter pada subbab sebelumnya kemudian dimasukkan ke dalam model motor induksi. Model motor induksi tiga phasa diperoleh dari Persamaan 2.12, Persamaan 2.13 dan Persamaan fluks 2.14 yang direpresentasikan dalam persamaan state arus motor induksi pada *synchronously rotating frame* seperti Persamaan 3.3.

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= (R_s + SL_s) i_{ds} - \omega_e L_s i_{qs} + SL_m i_{dr} - \omega_e L_s i_{qr} \\
 V_{ds} &= \omega_e L_s i_{ds} + (R_s + SL_s) i_{qs} + \omega_e L_m i_{dr} + SL_m i_{qr} \\
 V_{dr} &= SL_m i_{ds} - (\omega_e - \omega_r) L_m i_{qs} + (R_r + SL_r) i_{dr} - (\omega_e - \omega_r) L_s i_{qr} \\
 V_{qr} &= (\omega_e - \omega_r) L_m i_{ds} + SL_m i_{qs} + (\omega_e - \omega_r) L_r i_{dr} + (R_r + SL_r) i_{qr}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

dalam bentuk matriks diperoleh Persamaan 3.4 atau Persamaan 3.5.

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + SL_s) & -\omega_e L_s i_{ds} & SL_m i_{qr} & -\omega_e L_m i_{dr} \\ \omega_e L_s & (R_s + SL_s) & \omega_e L_m & SL_m \\ SL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_m & (R_r + SL_r) & -(\omega_e - \omega_r) L_s \\ (\omega_e - \omega_r) L_m & SL_m & (\omega_e - \omega_r) L_r & (R_r + SL_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_e L_s & 0 & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_s & R_s & \omega_e L_m & 0 \\ SL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_m & R_r & -(\omega_e - \omega_r) L_r \\ (\omega_e - \omega_r) L_m & 0 & (\omega_e - \omega_r) L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \\
+ \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

dengan ,

$$P = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_e L_s & 0 & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_s & R_s & \omega_e L_m & 0 \\ SL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_m & R_r & -(\omega_e - \omega_r) L_r \\ (\omega_e - \omega_r) L_m & 0 & (\omega_e - \omega_r) L_r & R_r \end{bmatrix} \\
Q = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

maka diperoleh bentuk persamaan state arus seperti Persamaan 3.6 dan Persamaan 3.7.

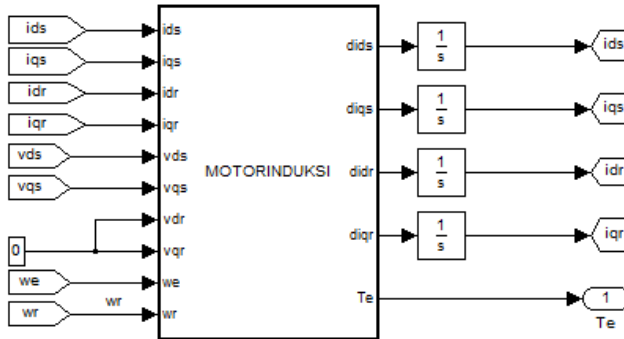
$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \dot{i}_{dq} &= Ai_{dq} + Bv_{dq} \end{aligned} \quad (3.6)$$

di mana,

$$A=Q^{-1}; B=Q^{-1}P$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = Q^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} - Q^{-1}P \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Persamaan state arus motor induksi kemudian dimasukkan ke dalam *embedded matlab function*, sehingga model motor induksi nantinya berupa fungsi yang menghasilkan arus dua fasa motor. Gambar 3.2 menunjukkan model motor induksi tiga fasa dengan menggunakan *embedded function* pada SIMULINK. *List program* di dalam *embedded function* seperti pada lampiran A.

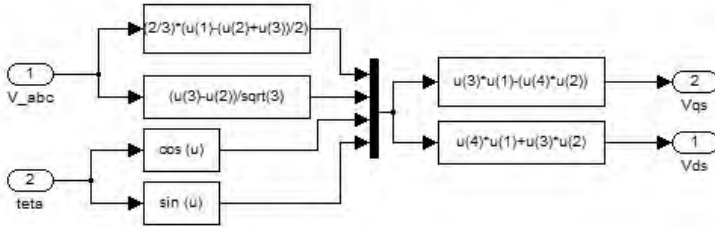


**Gambar 3.2** *Embedded Matlab Function* Motor Induksi Tiga Fasa

### 3.2.2 Transformasi abc ke dq

Blok Tranformasi abc2dq berisi Persamaan 2.3 yaitu transformasi tiga fasa (abc) menjadi dua fasa ( $\alpha\beta$ ) dan Persamaan 2.5 yang merupakan transformasi dua fasa *frame* stasioner ( $\alpha\beta$ ) ke dua fasa pada *synchronously rotating frame* (dq). Pada Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.5 variabel x dapat berupa tegangan, fluks maupun arus. Selanjutnya persamaan tersebut dimasukkan ke dalam *function* sehingga diperoleh blok transformasi abc ke dq.





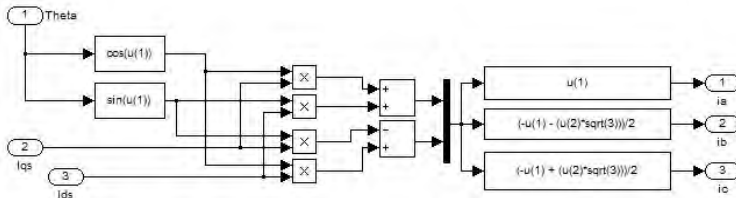
**Gambar 3.3** Blok Transformasi Tegangan abc2dq

Gambar 3.3 menunjukkan blok transformasi tegangan tiga fasa ke tegangan dua fasa stasioner ( $\alpha\beta$ ) dan transformasi tegangan dua fasa( $\alpha\beta$ ) ke dua fasa pada *synchronously rotating frame* (dq). Sedangkan untuk transformasi dua fasa ke tiga fasa digunakan Persamaan 3.8 dan Persamaan 3.9 yang merupakan *invers* dari Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.5.

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2}\sqrt{3} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Gambar 3.4 menunjukkan blok transformasi dua fasa (dq) ke tiga fasa (abc).



**Gambar 3.4** Transformasi Arus dq2abc

### 3.2.3 Perhitungan Tetha( $\theta$ )

Tetha merupakan selisih sudut stator dan sudut rotor pada *synchronously rotating frame*. Nilai tetha digunakan untuk transformasi koordinat dari *frame* stasioner ke *synchronously rotating frame* yang diperoleh dari nilai arus pada *frame* dq dan fluks rotor. Persamaan 3.10 menunjukkan persamaan fluks rotor dan Persamaan 3.11 menunjukkan persamaan tetha.

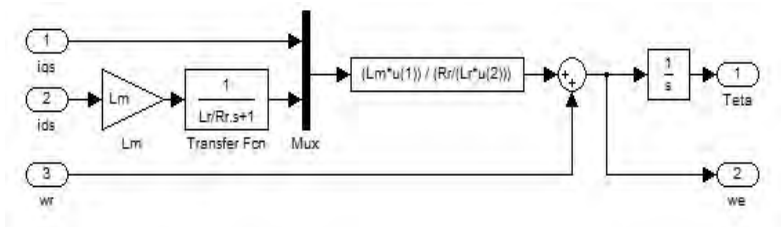
$$\psi_{dr}(s) = \frac{L_m}{(1+s\tau_r)} \times i_{ds}(s) \quad (3.10)$$

di mana,

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$$

$$\theta = \int (\omega_s + \omega_r) dt = \int \left( \left( \frac{L_m}{\tau_r \psi_{dr}} \times i_{qs} \right) + \omega_r \right) dt \quad (3.11)$$

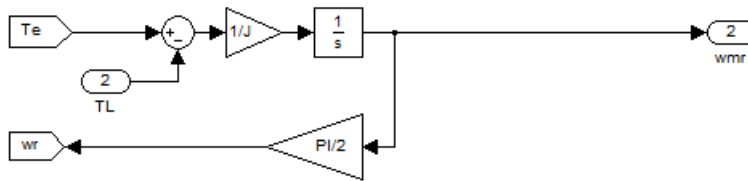
Dari Persamaan 3.10 dan Persamaan 3.11 dibuat blok perhitungan nilai tetha seperti Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Blok Perhitungan Tetha ( $\theta$ )

### 3.2.4 Perhitungan Kecepatan

Perhitungan kecepatan motor diperoleh dari Persamaan 2.19 untuk kecepatan mekanik motor, sedangkan untuk kecepatan elektrik motor diperoleh dari Persamaan 2.20. Gambar 3.6 menunjukan diagram blok perhitungan kecepatan mekanik ( $w_{mr}$ ) dan kecepatan elektrik motor ( $w_r$ ).



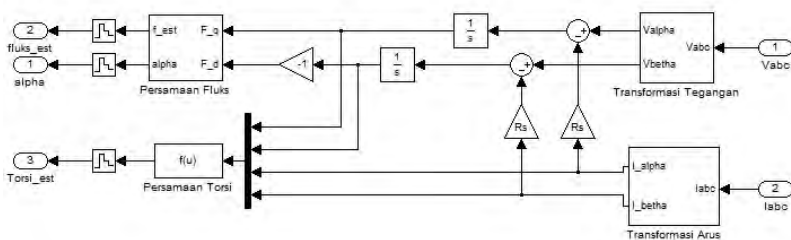
**Gambar 3.6** Blok Perhitungan Kecepatan

### 3.3 Perancangan Direct Torque Control (DTC)

Pada Tugas Akhir ini, digunakan metode *Direct Torque Control* (DTC) untuk mengatur secara langsung torsi dari motor induksi tiga fasa. Dalam metode *Direct Torque Control* (DTC) terdapat beberapa bagian di dalam pengaturan torsi seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

#### 3.3.1 Blok Estimator

Seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya, blok estimator digunakan untuk menentukan nilai fluks, torsi dan sudut fluks stator. Nilai *magnitude* dan sudut fluks stator ditentukan dengan Persamaan 2.30 dan Persamaan 2.31, sedangkan nilai torsi ditentukan dengan Persamaan 2.32. Gambar 3.7 menunjukkan blok estimator pada SIMULINK.

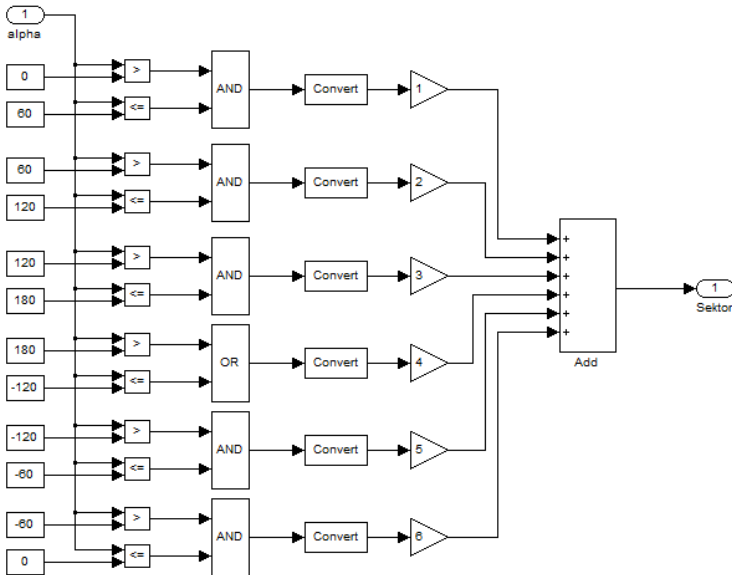


**Gambar 3.7** Blok Estimator DTC

Pada blok estimator terdapat blok Transformasi tegangan dan arus dari tiga fasa ke dua fasa seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya sebagai masukan dalam perhitungan fluks, sudut fluks dan torsi.

### 3.3.2 Perancangan Sektor Sudut Fluks Stator Pada DTC

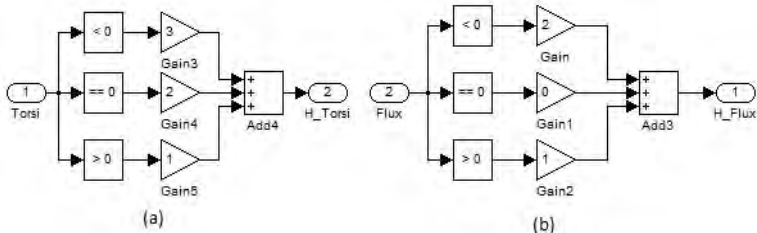
Blok Sektor sudut fluks stator berfungsi untuk menentukan posisi vektor dari tegangan *inverter* berdasarkan nilai sudut fluks yang diestimasi. Pada tugas akhir ini menggunakan metode DTC modifikasi sehingga pembagian sektor blok ini ditunjukkan seperti pada gambar 3.8.



**Gambar 3.8** Blok Sektor Sudut Fluks Stator

### 3.3.3 Perancangan Blok Komparator

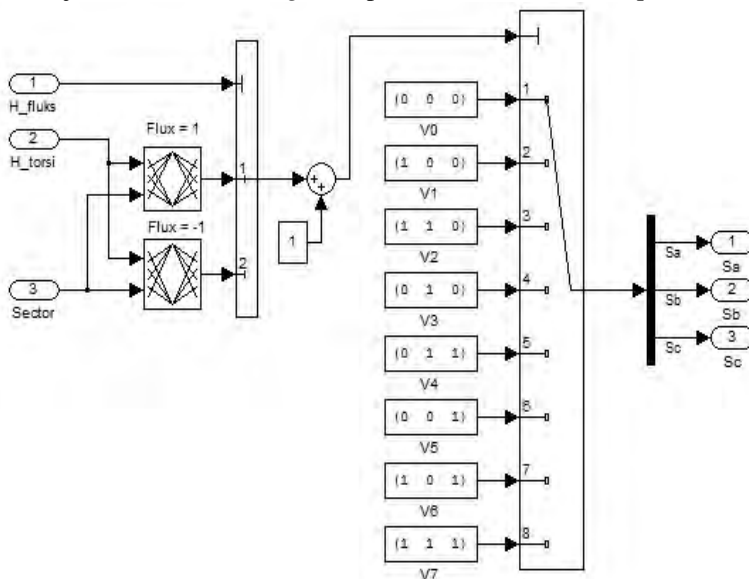
Nilai dari fluks dan torsi estimator yang diperoleh dari blok estimator kemudian dibandingkan dengan nilai fluks dan torsi referensi dengan persamaan 2.33 dan 2.34 sehingga diperoleh nilai *error* dari fluks dan torsi. Nilai *error* tersebut selanjutnya dimasukkan ke dalam blok komparator. Keluaran dari blok ini berupa *Two-Level* dan *Three-Level* histeresis untuk menentukan aturan dari *switching table*. Gambar 3.9 menunjukkan blok komparator fluks dan torsi.



**Gambar 3.9** (a) Blok Komparator Torsi, (b) Blok Komparator Fluks

### 3.3.4 Perancangan Blok *Switching Tabel*

Blok *switching table* digunakan untuk memilih vektor tegangan yang aktif berdasarkan kondisi yang diperoleh dari blok komparator fluks dan torsi serta sektor dari blok sektor sudut fluks stator. Kondisi-kondisi tersebut kemudian disesuaikan dengan Tabel 2.1 dengan menggunakan *look up table* sehingga nantinya terdapat terdapat 8 vektor yang akan menentukan kondisi *switch* dari *inverter*. Gambar 3.10 menunjukkan blok *switching table* pada simulasi *Direct Torque Control*.



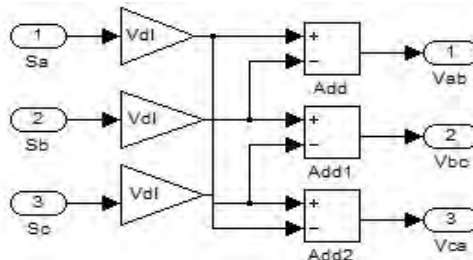
**Gambar 3.10** Blok *Switching Table*

### 3.3.5 Perancangan Blok *Inverter*

Blok *inverter* merupakan blok untuk mendapatkan tegangan tiga fasa (abc). Pada perancangan blok *inverter* ini digunakan hubungan delta sehingga blok ini berupa perhitungan seperti Persamaan 3.10

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} &= V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} &= V_{co} - V_{ao} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Tegangan  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  dan  $V_{co}$  merupakan tegangan fasa motor ke netral sumber tegangan. Gambar 3.11 menunjukkan blok *inverter* pada sistem.

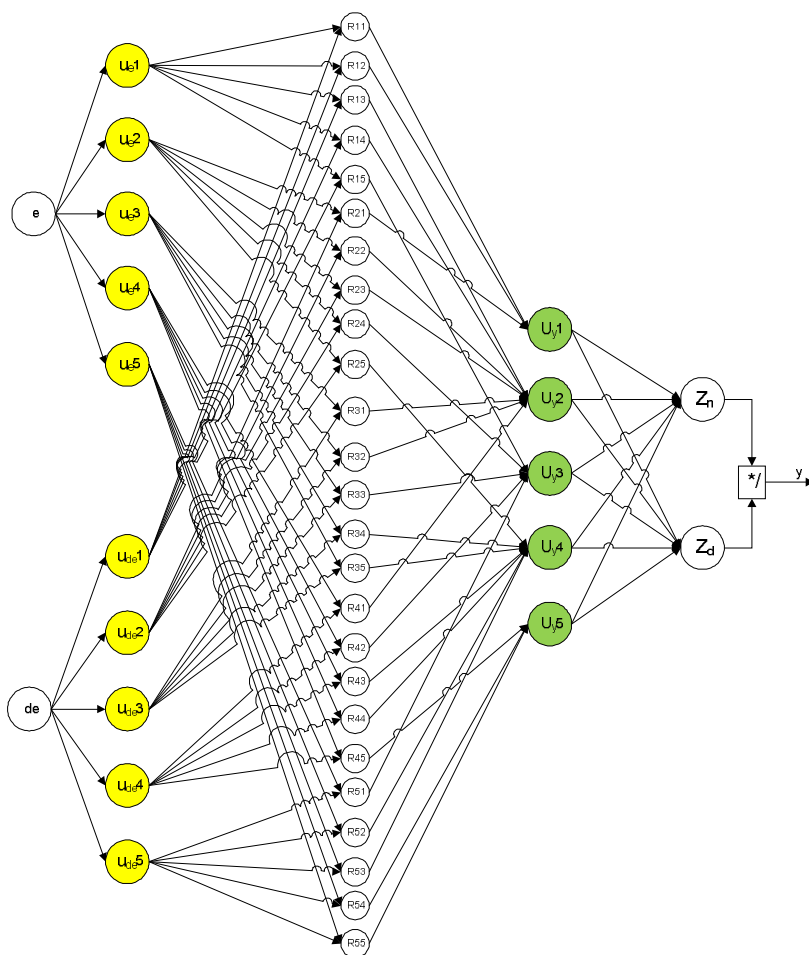


**Gambar 3.11** Blok *Inverter*

### 3.4 Perancangan Kontroler *Neuro Fuzzy*

Pada Tugas Akhir ini digunakan kontroler *Neuro Fuzzy* untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa. Kontroler *Neuro Fuzzy* digunakan untuk mengatur batas nilai referensi torsi dari selisih kecepatan referensi dengan kecepatan aktual. Kontroler *Neuro Fuzzy* yang digunakan adalah kontroler *Neuro Fuzzy* Larsent karena hanya diperlukan perbaikan nilai tengah dari himpunan pendukung sinyal kontrol dan *rule base* yang digunakan tetap.

Gambar 3.12 menunjukkan struktur kontroler *Neuro Fuzzy* Larsent dengan 5 buah himpunan pendukung. Pada struktur tersebut terdapat 1 lapisan masukan, 5 lapisan *hidden* dan 1 lapisan keluaran.



**Gambar 3.12** Struktur *Neuro Fuzzy*

### 3.4.1 Tahap *Forward Propagation*

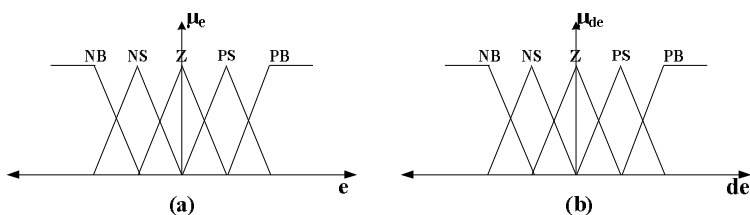
Pada tahap *Forward Propagation* dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai dari sinyal kontrol. Tahapan ini terdiri dari 5 lapisan yang setiap lapisan berisi proses perhitungan *fuzzy*.

### Lapisan 1 :

Lapisan pertama merupakan lapisan masukan dari *error* dan *delta error*, dengan nilai bobot 1. Hasil keluaran pada proses ini diperoleh dari Persamaan 2.49 dan akan menjadi masukan pada lapisan kedua yang akan melakukan proses *fuzzifikasi*.

### Lapisan 2 :

Lapisan kedua terdiri dari 10 node yang merupakan proses *fuzzifikasi* dari *error* dan *delta error*. Fungsi keanggotaan yang digunakan yaitu fungsi segitiga dengan 5 himpunan pendukung untuk *error* dan *delta error*. Gambar 3.13 menunjukkan fungsi keanggotaan dari *error* dan *delta error*.



**Gambar 3.13** Fungsi Keanggotaan : (a) *error*; (b) *delta error*

Keluaran dari lapisan ini diperoleh dari Persamaan 2.51, dengan nilai  $n$  dan  $m$  sama dengan 5 karena setiap masukan yaitu *error* dan *delta error* mempunyai 5 himpunan pendukung.

### Lapisan 3 :

Lapisan ketiga merupakan lapisan basis aturan dengan menggunakan tabel Mack Vicar Wheelan seperti Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Tabel Basis Aturan Mack Vicar Wheelan

	$u_{e1}$	$u_{e2}$	$u_{e3}$	$u_{e4}$	$u_{e5}$
$u_{de1}$	1	1	2	2	3
$u_{de2}$	1	2	2	3	4
$u_{de3}$	2	2	3	4	4
$u_{de4}$	2	3	4	4	5
$u_{de5}$	3	4	4	5	5



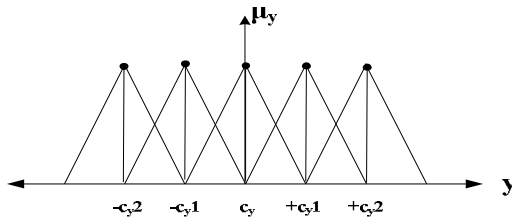
Dengan memasukkan dari fungsi keanggotaan *error* dan *delta error* diperoleh nilai dari basis aturan. Basis aturan ini menggunakan operasi seperti pada Persamaan 2.52 karena menggunakan struktur *Neuro Fuzzy* Larsent.

#### Lapisan 4 :

Hasil dari basis aturan kemudian dihitung dalam operasi inferensi pada lapisan keempat. Operasi yang digunakan seperti pada Persamaan 2.53 dan Persamaan 2.54, sehingga bobot pada lapisan ini bernilai 1 karena pada proses *backward* nanti tidak dilakukan proses revisi pada operasi inferensi ini.

#### Lapisan 5 :

Proses *defuzzifikasi* pada lapisan ini menggunakan fungsi *singleton* seperti Gambar 3.14.



**Gambar 3.14** Fungsi *Singleton* sinyal keluaran

Proses perhitungan dilakukan dengan Persamaan 2.55 dengan nilai bobot berupa nilai tengah dari fungsi. Nilai tengah ini nanti yang akan direvisi nilainya supaya sinyal keluaran atau sinyal kontrol dapat sesuai dengan yang dibutuhkan *plant*.

### 3.4.2 Tahap *Backward Propagation*

Pada tugas akhir ini, struktur *Neuro Fuzzy* yang digunakan ialah struktur *Neuro Fuzzy* Larsent sehingga proses *backward* atau proses revisi bobot hanya dilakukan pada lapisan kelima yaitu lapisan *defuzzifikasi* untuk menghasilkan sinyal kontrol. Revisi bobot berupa revisi nilai tengah dari fungsi keanggotaan fungsi sinyal kontrol. Untuk menghitung bobot atau nilai tengah baru digunakan Persamaan 2.56.

## **BAB 4**

### **HASIL SIMULASI DAN ANALISA SISTEM**

#### **4.1. Gambaran Singkat Simulasi Sistem**

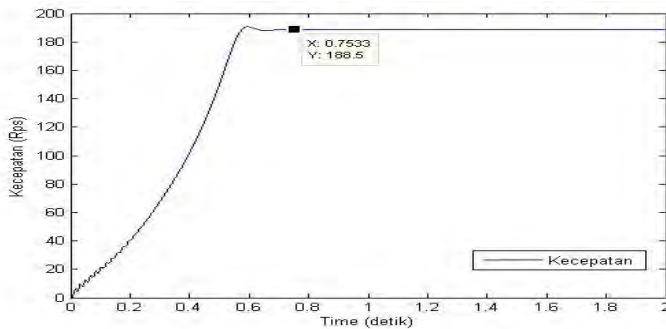
Simulasi sistem berupa simulasi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *Direct Torque Control* berbasis kontroler *Neuro Fuzzy*. Kecepatan referensi motor induksi dibuat konstan kemudian dilakukan pengujian terhadap kontroler *Neuro Fuzzy* apakah kontroler tersebut dapat mengatasi perubahan respon pada motor induksi karena perubahan kecepatan referensi pada saat terjadi perubahan beban pada motor induksi baik perubahan secara langsung maupun perubahan beban secara gradual.

Pengujian pertama dilakukan untuk mengetahui respon motor induksi tanpa kontroler dan tanpa beban sehingga dapat diketahui beban nominal maupun maksimal dari slip motor. Selanjutnya, dilakukan identifikasi parameter untuk memperoleh *transfer function* dari *plant* (motor induksi dan DTC). *Transfer function* dengan respon yang paling mendekati akan digunakan untuk proses *learning* awal kontroler *Neuro Fuzzy* sehingga nantinya akan diperoleh parameter kontroler *Neuro Fuzzy*. Selanjutnya, dilakukan pengujian terhadap kontroler *Neuro Fuzzy* dengan memberikan perubahan beban pada motor untuk mendapatkan karakteristik Kontroler *Neuro Fuzzy*.

#### **4.2. Simulasi Motor Induksi Tiga fasa**

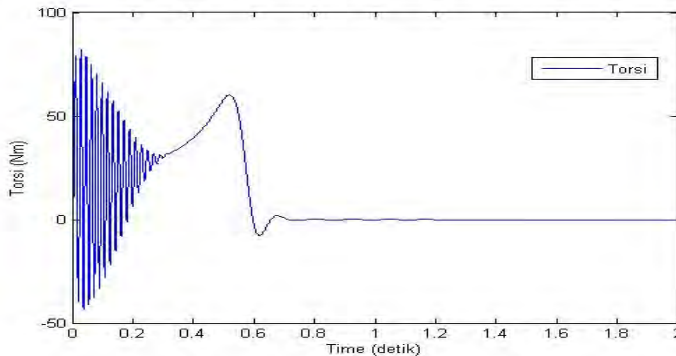
Simulasi ini dilakukan untuk melihat karakteristik dari model matematika dari motor induksi yang telah dibuat. Sumber tegangan tiga fasa yang diberikan konstan sehingga frekuensi kecepatan medan putar juga konstan. Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan respon kecepatan dan torsi untuk pengujian pada kondisi tak berbeban. Dari gambar respon kecepatan dan torsi dapat diperoleh karakteristik dari motor induksi yang dirancang antara lain :

Kecepatan nominal	= 188,5 rps = 1800 Rpm
Time Konstan ( $\tau$ )	= 0,4418 detik
Waktu mencapai <i>steady state</i>	= 0,7533 detik
<i>Overshoot</i> (Mp)	= 1,16%
<i>Rise time</i> (tr (5% -95%))	= 0,6779 detik



**Gambar 4.1.** Respon Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

Pada respon torsi menunjukkan waktu *starting* motor sebesar 1,2 detik dengan nilai torsi awal sebesar 80 Nm.



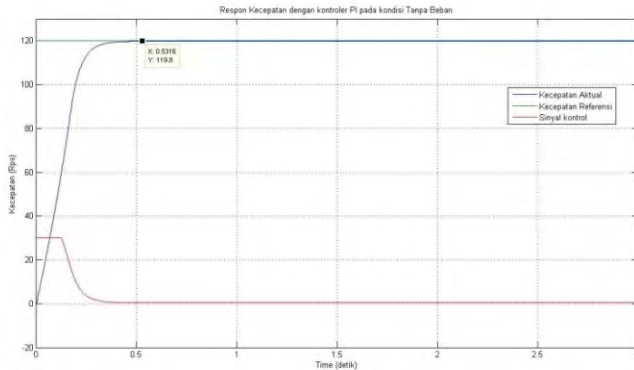
**Gambar 4.2.** Respon Torsi Motor Induksi 3 fasa

#### 4.3. Simulasi dan Pengujian *Direct Torque Control* (DTC) dengan Kontroler PI

Pada dasarnya metode *Direct Torque Control* (DTC) menggunakan kontroler PI sebagai kontroler kecepatan. Pada subbab ini akan mensimulasikan metode *Direct Torque Control* dengan kontrol PI pada *plant* motor induksi yang telah dirancang. Nilai parameter kontroler PI diperoleh dari hasil *Tunning* dengan nilai  $K_p$  sebesar 0,5 dan nilai  $K_i$  sebesar 0,02.

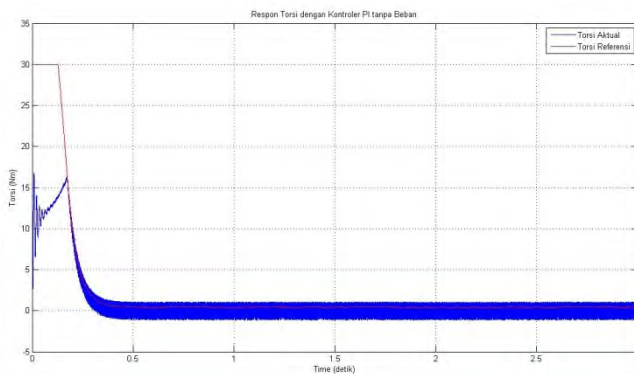
### 4.3.1. Simulasi dan Pengujian Tanpa Beban

Simulasi dilakukan pada kondisi tanpa beban untuk melihat karakteristik kontrol PI pada pengaturan kecepatan motor induksi tiga phasa. Gambar 4.3 menunjukkan Respon kecepatan motor induksi dengan kontroler PI pada kondisi tanpa beban.



**Gambar 4.3.** Respon kecepatan motor dengan kontrol PI pada kondisi tanpa beban

Pada kondisi tanpa beban dengan kontroler PI respon mencapai *steady state* pada  $t = 0,5316$  detik, dengan *rise time* sebesar 0,478 detik dan kecepatan motor sebesar 119,8 rps. Sehingga diperoleh *error steady state* sebesar 0,167%.



**Gambar 4.4.** Respon Torsi motor dengan kontrol PI pada kondisi tanpa beban

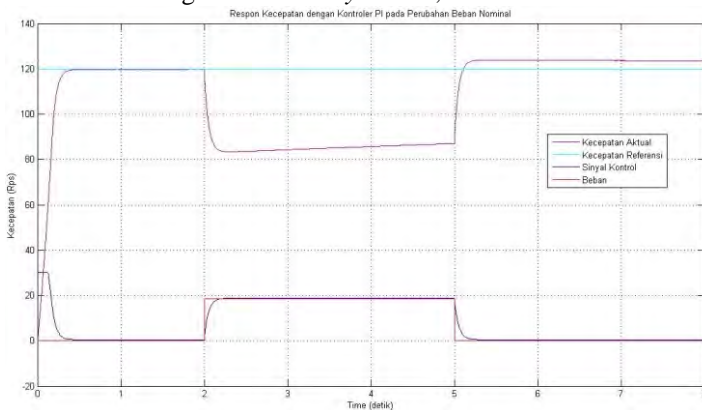
Dari Gambar 4.4, torsi yang dihasilkan motor mengikuti torsi referensi yang diberikan dengan *ripple* pada torsi aktual sebesar  $\pm 2,17$  Nm.

#### 4.3.2. Simulasi dan Pengujian dengan Perubahan Beban Langsung

Simulasi dengan pengujian beban dilakukan dengan memberikan beban langsung dan beban gradual terhadap *plant* dan kontroler PI untuk mengetahui karakteristik kontroler PI. Terdapat tiga beban pengujian yaitu beban Nominal, beban minimal dan maksimal.

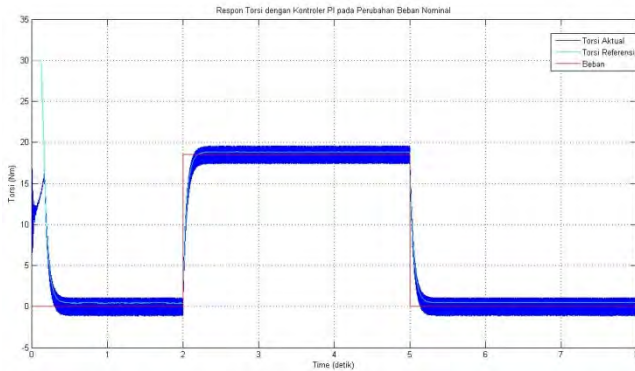
##### 4.3.2.1. Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Nominal

Pada pengujian dengan beban nominal diperoleh respon kecepatan motor induksi dengan kontroler PI seperti Gambar 4.5. Dari respon terlihat bahwa pada respon awal karakteristik respon seperti pada saat tanpa beban. Pada saat diberi beban pada  $t = 2$  detik respon kecepatan turun dan tidak mencapai *steady state* kembali. Setelah beban dilepas pada  $t = 4$  detik, respon kembali naik dan kembali *steady state* pada  $t = 6$  detik dengan *error steady state* 2,91%.



**Gambar 4.5.** Respon kecepatan motor dengan kontrol PI pada perubahan beban nominal

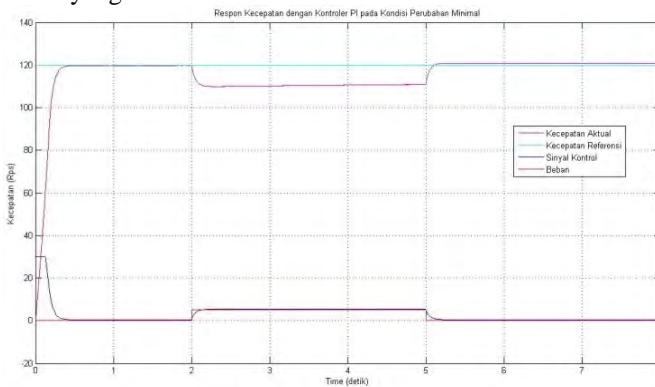
Gambar 4.6 Menunjukkan respon keluaran torsi dimana torsi keluaran mengikuti pertambahan nilai torsi referensi pada saat saat diberi beban. Torsi aktual mempunyai nilai sebesar  $\pm 18,5$  Nm dengan *ripple* sebesar  $\pm 2,17$  Nm saat diberi beban sebesar 18,5 Nm



**Gambar 4.6.** Respon Torsi motor dengan kontrol PI pada perubahan Beban Nominal

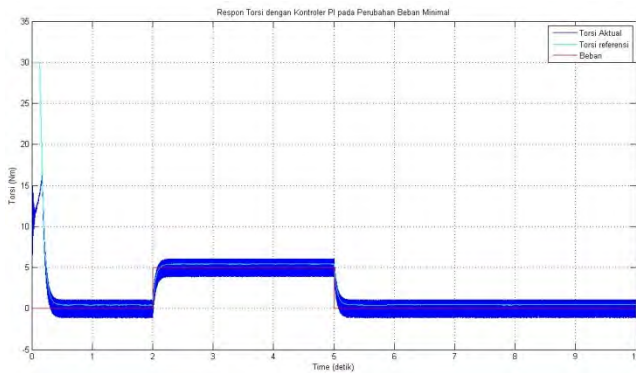
#### 4.3.2.2. Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Minimal

Pada pengujian dengan beban minimal, respon kecepatan motor induksi sama seperti respon kecepatan pada saat diberi beban nominal. Perbedaannya pada besarnya kecepatan yang turun karena perbedaan nilai beban yang diberikan.



**Gambar 4.7.** Respon kecepatan motor dengan kontrol PI pada beban minimal

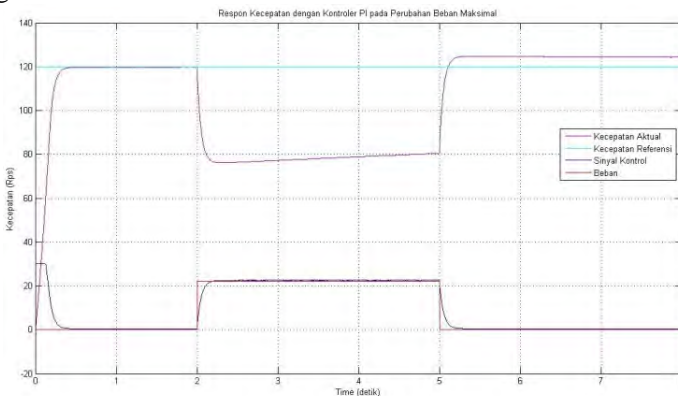
Respon torsi yang dihasilkan dengan perubahan beban minimal terlihat seperti Gambar 4.8 dengan nilai torsi aktual sebesar  $\pm 5$  Nm dengan *ripple* torsi sebesar  $\pm 2,17$  Nm pada saat diberi beban minimal.



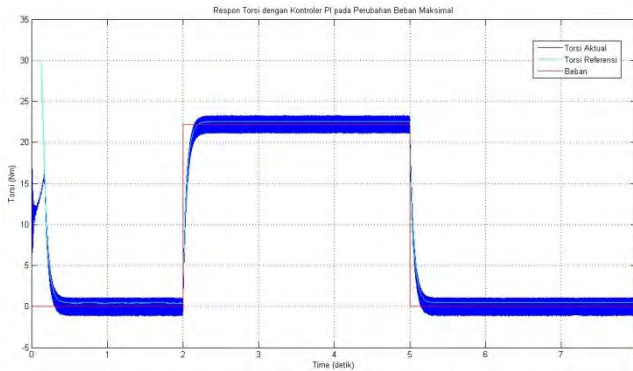
**Gambar 4.8.** Respon Torsi motor dengan kontrol PI pada perubahan Beban Minimal

#### 4.3.2.3. Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Maksimal

Pada pengujian beban maksimal, respon kecepatan  $w$  mempunyai karakteristik yang sama dengan saat kondisi beban nominal dan minimal. Sehingga dapat diketahui bahwa kontroler PI mempunyai karakteristik yang sama untuk pengujian beberapa beban. Gambar 4.9 menunjukkan respon kecepatan motor induksi pada beban maksimal dengan kontroler PI.



**Gambar 4.9.** Respon kecepatan motor dengan kontrol PI pada beban maksimal

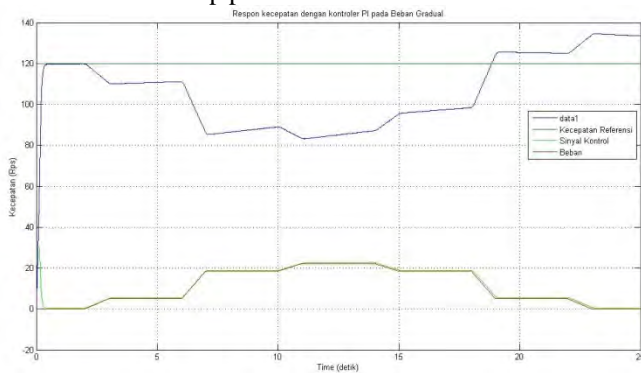


**Gambar 4.10** Respon Torsi motor dengan kontrol PI pada perubahan Beban Maksimal

Dari respon torsi yang dihasilkan seperti pada Gambar 4.10, torsi aktual mengikuti torsi referensi yang diberikan sebesar  $\pm 22,2$  Nm dengan *ripple* sebesar  $\pm 2,17$  Nm saat diberi beban maksimal.

#### 4.3.3. Pengujian pada Perubahan *Gradual*

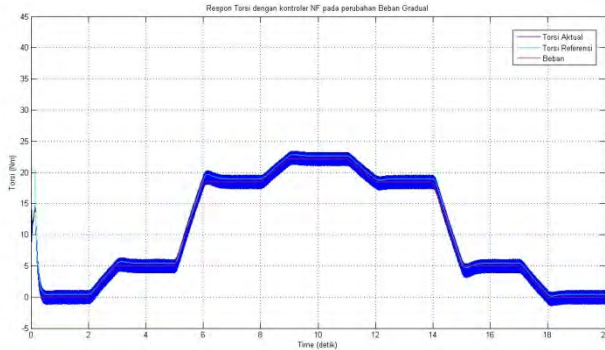
Pengujian dilakukan dengan memberikan beban *gradual* pada rancangan sistem. Dari respon sistem yang dihasilkan dapat dilihat pengaruh pembebanan secara *gradual* terhadap sistem yang dirancang. Gambar 4.11 menunjukkan respon dengan perubahan beban *gradual* selama 2 detik untuk setiap perubahan nilai beban.



**Gambar 4.11.** Respon Kecepatan motor dengan kontroler PI pada perubahan *gradual* beban 2 detik.

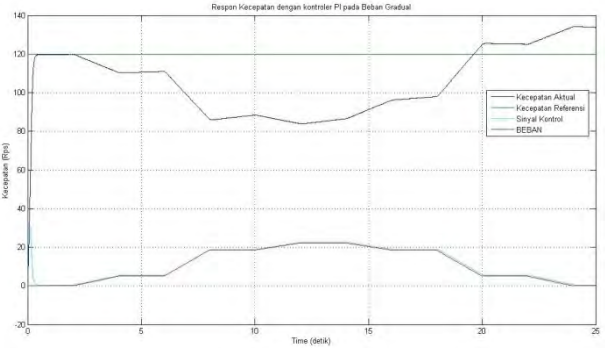


Dari hasil respon yang dihasilkan dapat terlihat bahwa respon kecepatan berubah dari nilai kecepatan referensi yang diberikan selama pemberian beban. Respon torsi yang dihasilkan dapat mengikuti nilai torsi referensi dan torsi beban yang diberikan seperti pada Gambar 4.12



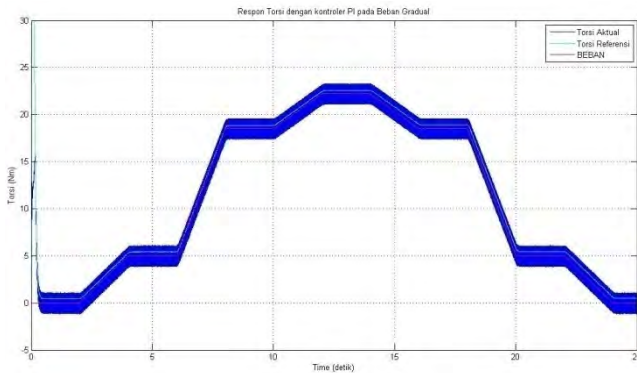
**Gambar 4.12.** Respon Torsi motor dengan dengan perubahan beban selama 2 detik.

Gambar 4.13 menunjukkan simulasi dengan perubahan beban *gradual* selama 1 detik untuk perubahan bebannya. Dari respon yang dihasilkan sama dengan perubahan *gradual* sebelumnya dimana respon kecepatan tidak dapat mengikuti kecepatan referensi.



**Gambar 4.13.** Respon Kecepatan motor dengan dengan perubahan beban selama 1 detik.

Sedangkan respon torsi dapat mengikuti nilai torsi referensi dan torsi beban yang diberikan seperti pada Gambar 4.14



**Gambar 4.14.** Respon Torsi motor dengan dengan perubahan beban selama 1 detik.

#### 4.4. Simulasi dan Pengujian *Direct Torque Control* (Dtc) dengan Kontroler *Neuro Fuzzy*

Pada subbab ini, akan disimulasikan metode *Direct Torque Control* (DTC) dengan kontroler *Neuro Fuzzy*. Pada pengujiannya, rancangan akan disimulasikan perubahan beban baik perubahan beban langsung maupun *gradual* untuk mengetahui karakteristik kontroler.

##### 4.4.1. Proses *Learning* Kontroler *Neuro Fuzzy*

Identifikasi parameter dilakukan untuk mendapatkan model *transfer function* dari model matematik *plant* yang sebenarnya pada kondisi tidak berbeban tetapi kecepatan referensinya berubah. *Plant* yang diidentifikasi adalah blok motor induksi dan blok DTC. Model *transfer function* ini nanti digunakan untuk proses *learning* kontroler *Neuro Fuzzy*.

Identifikasi dilakukan dengan menghitung rata-rata dari nilai masukan dan nilai keluaran dari *plant*. Hasil identifikasi yang diperoleh kemudian dimasukkan kontroler PI untuk menentukan nilai RRMSE dari model tersebut. Tabel 4.1 menunjukkan data identifikasi yang telah dilakukan.

Dari data pada Tabel 4.1 diperoleh pemodelan dengan nilai RRMSE paling kecil ialah 0,6042%. *Transfer function* dengan nilai RRMSE paling kecil kemudian dimasukkan kontroler *Neuro Fuzzy* untuk melakukan proses *learning*.

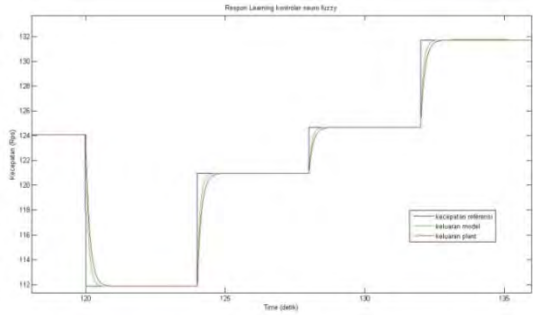
**Tabel 4.1** Tabel Identifikasi Parameter

No.	Transfer Function	RRMSE (%)
1.	$G(s) = \frac{31,83s + 5233}{s^2 + 149,8s + 47}$	0,7764
2.	$G(s) = \frac{28,99s + 1,412e^4}{s^2 + 359,9s + 126,9}$	0,8667
3.	$G(s) = \frac{31,92s + 4690}{s^2 + 136,9s + 42,03}$	0,7609
4.	$G(s) = \frac{27,37s + 613,7}{s^2 20,97s + 5,542}$	0,6042
5.	$G(s) = \frac{32,01s + 4143}{s^2 + 124,2s + 37,3}$	0,7395

Proses *learning* menggunakan model referensi yang telah ditentukan dengan spesifikasi *settling time* ( $ts \pm 2\%$ ) = 0,4 detik, *overshoot* (Mp) = 0% dan *rise time* (tr) = 0,36 detik. Model referensi yang diperoleh

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{0,1s + 1}$$

Gambar 4.15 menunjukkan Respon *learning* dari pemodelan yang telah diperoleh.



**Gambar 4.15.** Respon Proses Learning Kontroler *Neuro Fuzzy*

Dari proses *learning* yang telah dilakukan diperoleh data parameter kontroler *Neuro Fuzzy* seperti pada tabel 4.2.

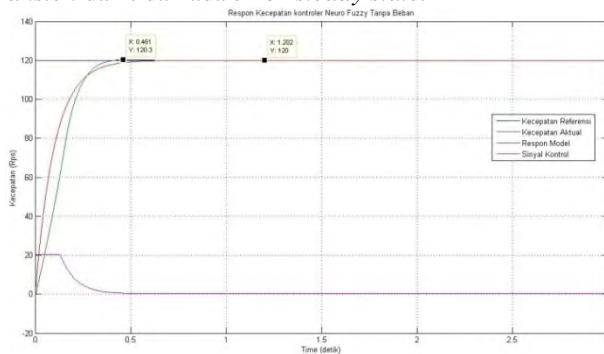
**Tabel 4.2** Parameter Kontroler *Neuro Fuzzy*

No.	Parameter	Nilai
1.	Bobot (nilai tengah) awal (c)	-28,8303
		-13,8303
		1,1697
		16,1697
		31,1697
2.	<i>Learning rate</i> (alpha/ $\alpha$ )	0,0100
3.	Siklus belajar (epoh)	10,000
4.	Konstanta fungsi aktivasi (Lamda/ $\lambda$ )	1,0000

#### 4.4.2. Simulasi dan Pengujian Tanpa Beban

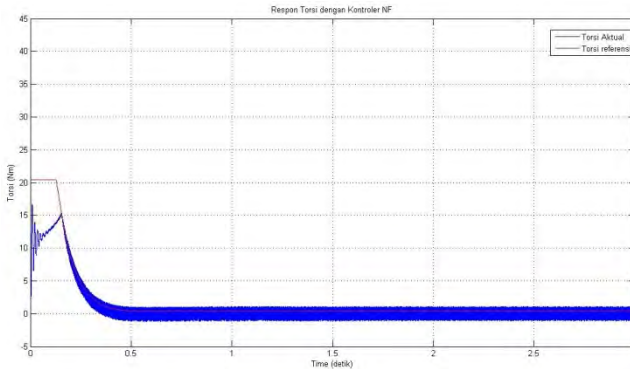
Hasil parameter kontroler *Neuro Fuzzy* yang telah diperoleh kemudian disimulasikan pada rancangan *plant* yang sebenarnya. Dari rancangan tersebut dilihat respon kecepatan motor dengan menggunakan kontroler *Neuro Fuzzy* pada kondisi tak berbeban.

Gambar 4.16 menunjukkan Respon simulasi kontroler *Neuro Fuzzy* pada motor induksi dengan *Direct Torque Control*. Dari Respon pada Gambar 4.16 diperoleh karakteristik kontroler antara lain respon mempunyai nilai *steady state* pada 120 rps pada 1,202 detik dan memiliki *overshoot* 0,25%. *Rise time* respon sebesar 1,081 detik selama waktu *transien* dan tidak ada *error steady state*.



**Gambar 4.16.** Respon kecepatan motor dengan kontroler *Neuro Fuzzy* pada kondisi tanpa beban

Gambar 4.17 menunjukkan respon torsi dimana torsi aktual motor dapat mengikuti torsi referensi yang diberikan dengan konstanta ripple sebesar  $\pm 2,002$  Nm.



**Gambar 4.17.** Respon Torsi motor dengan kontrol *Neuro Fuzzy* pada kondisi tanpa beban

#### 4.4.3. Simulasi dan Pengujian dengan Perubahan Beban Langsung

Hasil rancangan kontroler *Neuro Fuzzy* kemudian disimulasikan dan dilakukan pengujian pada kondisi berbeban dengan perubahan beban langsung maupun *gradual*. Besarnya nilai beban yang diterapkan sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya.

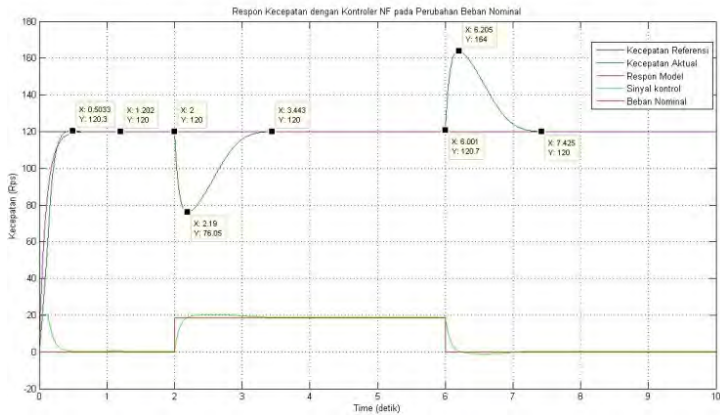
##### 4.4.3.1. Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Nominal

Pada simulasi ini, *plant* motor induksi diberi perubahan beban langsung yang besarnya beban sama dengan beban nominal yang dapat ditanggung oleh motor. Berdasarkan perhitungan pada bab sebelumnya, beban nominal dari motor induksi yang dirancang sebesar 18,5 Nm. Gambar 4.18 menunjukkan Respon kecepatan dengan kontroler *Neuro Fuzzy* pada saat perubahan beban nominal.

Dari gambar respon pada saat belum diberi beban respon mencapai *steady state* pada kecepatan 120 rps saat  $t = 1,202$  detik dengan *overshoot* 0,25% dan *rise time* 1,081 detik.

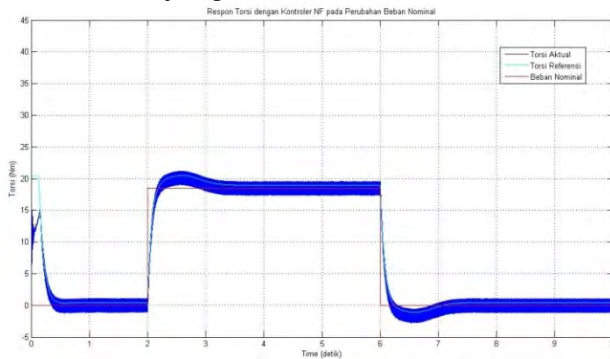
Saat diberi beban langsung pada  $t = 2$  detik respon kecepatan turun sebesar 76,03 rps dan kembali mencapai *steady state* pada  $t=3,461$  detik sehingga diperoleh *settling time* sebesar 1,461 detik, *rise time* sebesar 1,314 detik, tidak ada *overshoot* dan *error steady state*.

Saat beban dilepas pada  $t = 4$  detik, respon kecepatan naik hingga 164 rps dan kembali *steady state* pada  $t = 5,479$  detik, sehingga *settling time* saat beban dilepas sebesar 1,479 detik dan *rise time* sebesar 1,331 detik.



**Gambar 4.18.** Respon Kecepatan motor dengan kontrol *Neuro Fuzzy* pada beban nominal

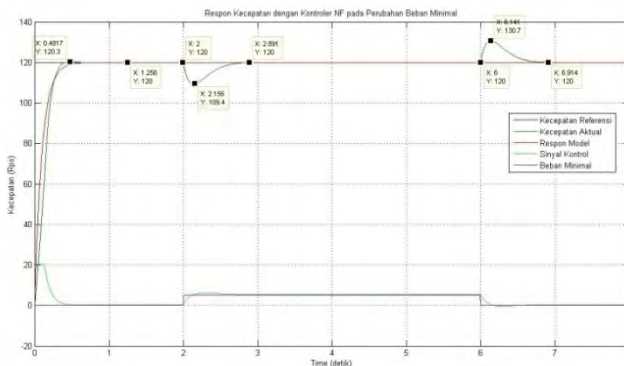
Gambar 4.19 menunjukkan respon torsi motor saat diberi beban nominal. Torsi aktual dapat mengikuti torsi referensi sesuai dengan beban yang diberikan. Besar nilai torsi aktual ialah  $\pm 18,5$  dengan *ripple* sebesar  $\pm 2,002$  saat terjadi perubahan beban.



**Gambar 4.19.** Respon Torsi motor dengan kontrol *Neuro Fuzzy* pada Perubahan Beban Nominal

#### 4.4.3.2. Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Minimal

Beban minimal ialah beban dibawah kondisi beban nominal motor. Tujuan pengujian pada kondisi minimal untuk mengetahui karakteristik kontroler *Neuro Fuzzy* apabila diberi kondisi beban minimal apakah mempunyai karakteristik yang sama dengan saat diberi beban nominal atau mempunyai respon yang lebih cepat. Gambar 4.20 menunjukkan Respon kontroler *Neuro Fuzzy* pada kondisi beban minimal.

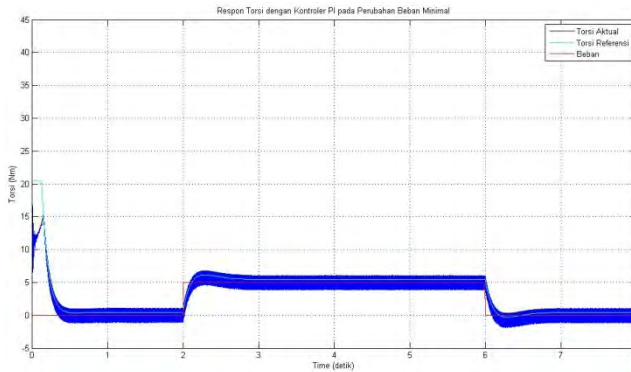


**Gambar 4.20.** Respon Kecepatan motor dengan kontrol *Neuro Fuzzy* pada beban minimal

Pada saat diberi beban minimal, respon awal mencapai *steady state* pada  $t = 1,203$  detik dengan *overshoot* 0,25% dan *rise time* 1,082 detik. Setelah diberi beban langsung pada  $t=2$  detik respon kecepatan turun menjadi 109,6 rps dan kembali *steady state* pada  $t=2,887$  detik. Sehingga diperoleh *settling time* sebesar 1,887 detik dan *rise time* sebesar 1,700 detik.

Saat beban dilepas pada  $t= 4$  detik, respon kecepatan naik menjadi 130,7 rps dan kembali *steady state* pada  $t = 4,896$  detik, sehingga *settling time* saat beban dilepas sebesar 1,896 detik dan *rise time* sebesar 1,701 detik.

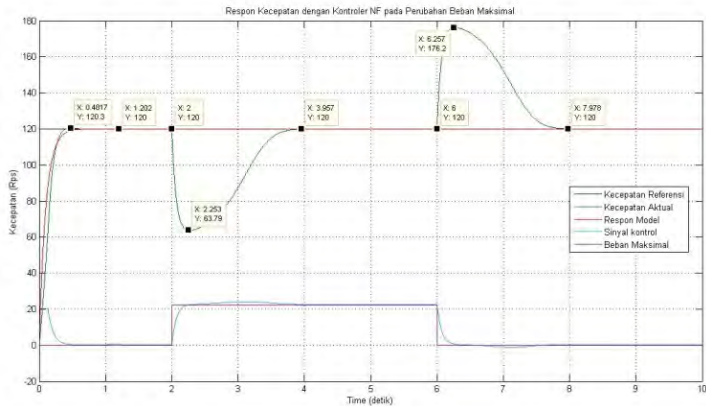
Pada respon torsi yang dihasilkan seperti pada Gambar 4.21 nilai torsi aktual dapat mengikuti torsi referensi dan perubahan beban yang terjadi sebesar  $\pm 5$  Nm dengan *ripple*  $\pm 2,002$  Nm.



**Gambar 4.21.** Respon Torsi motor dengan kontrol *Neuro Fuzzy* pada Perubahan Beban Minimal

#### 4.4.3.3. Pengujian pada Perubahan Beban Langsung dengan Beban Maksimal

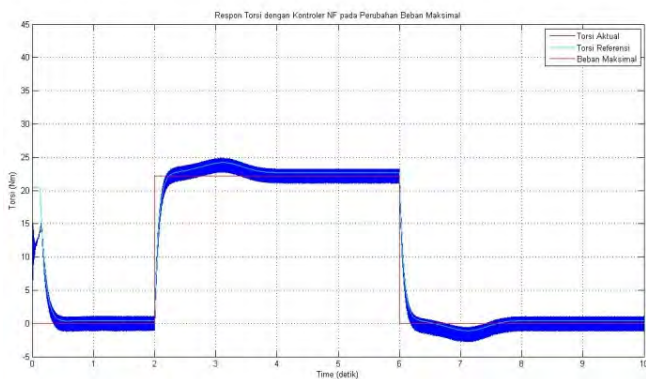
Pengujian beban maksimal untuk mengetahui batas maksimal dari torsi motor. Pada pengujian beban maksimal digunakan dari perhitungan yang diperoleh pada bab sebelumnya. Dengan pengujian pada kondisi maksimal dapat dilihat apakah karakteristik kontroler *Neuro Fuzzy* akan sama jika beban yang diberikan berbeda.



**Gambar 4.22.** Respon Kecepatan motor dengan kontrol *Neuro Fuzzy* pada beban maksimal



Pada simulasi pengujian beban maksimal respon mencapai *steady state* pada saat  $t = 1,203$  detik dengan overshoot 0,25% dan *rise time* sebesar 1,082 detik. Pada saat diberi beban pada detik ke-2, respon mengalami perubahan kecepatan menjadi 63,49 rps dan kembali mencapai *steady state* pada  $t = 3,951$  detik sehingga *settling time* pada saat diberi beban maksimal sebesar 1,951 detik dengan *rise time* 1,755 detik. Pada  $t = 4$  detik beban dilepas sehingga respon mengalami perubahan menjadi 176,3 rps dan mencapai *steady state* pada  $t = 6,023$  detik. *Settling time* pada saat beban maksimal dilepas sebesar 2,023 detik dengan *rise time* sebesar 1,828 detik.



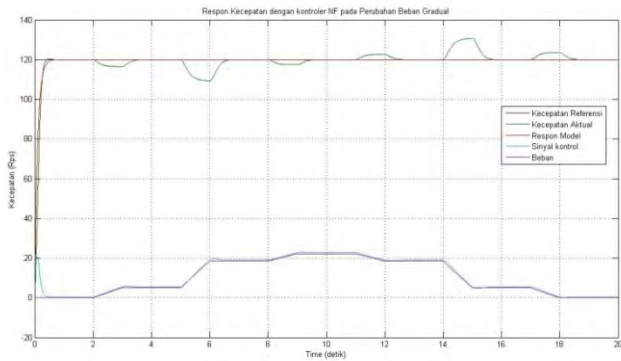
**Gambar 4.23.** Respon Torsi motor dengan kontrol *Neuro Fuzzy* pada Perubahan Beban Maksimal

Respon torsi yang dihasilkan mengikuti besar perubahan beban yang terjadi yaitu sebesar  $\pm 22,2$  Nm dengan *ripple*  $\pm 2,002$  Nm.

#### 4.4.4. Simulasi dan Pengujian pada Perubahan Beban Gradual

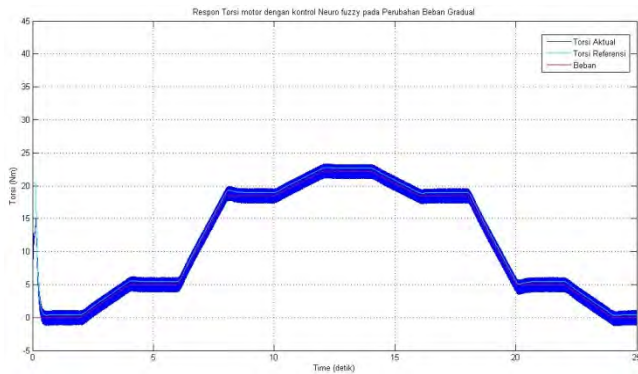
Beban *gradual* merupakan kondisi pembebanan pada motor dengan perubahan nilai beban secara *gradual* atau berangsur-angsur. Dengan perubahan yang demikian, dapat diperoleh perubahan respon yang lebih baik.

Dari Respon pada Gambar 4.24 perubahan kecepatan motor dengan perubahan beban *gradual* lebih kecil daripada dengan beban langsung seperti pengujian sebelumnya. Nilai waktu *steady state* yang diperoleh hampir sama untuk setiap besar nilai perubahan beban sekitar 1,6 detik.



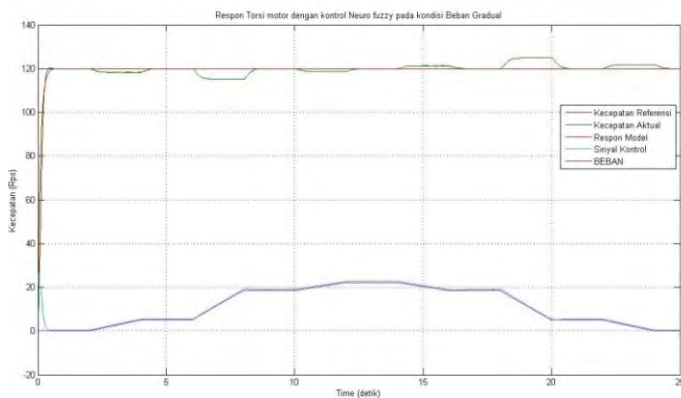
**Gambar 4.24.** Respon Kecepatan motor dengan kontroler *Neuro Fuzzy* pada perubahan beban selama 2 detik.

Respon torsi yang dihasilkan motor dengan perubahan beban *gradual* seperti Gambar 4.25. Nilai torsi aktual mengikuti besar nilai beban yang diberikan dengan rata-rata *ripple* torsi sebesar  $\pm 2,002$  Nm.

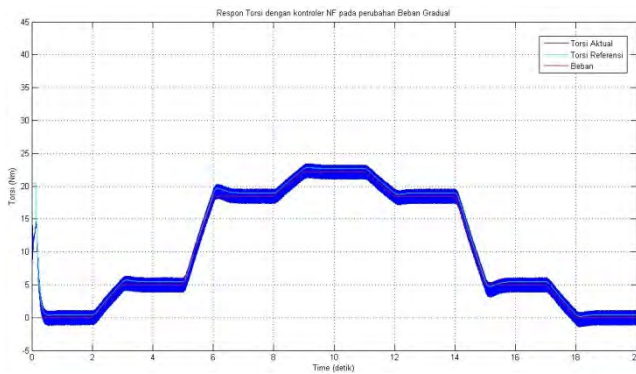


**Gambar 4.25.** Respon Torsi motor dengan perubahan beban selama 2 detik

Gambar 4.26 menunjukkan respon kecepatan motor dengan perubahan beban *gradual* selama 1 detik. Hasil yang diperoleh menunjukkan perubahan kecepatan lebih kecil daripada perubahan beban *gradual* selama 2 detik dengan waktu *steady state* yang hampir sama yaitu sekitar 1,6 detik. Nilai torsi yang dihasilkan sama dengan nilai perubahan beban hanya perubahan nilainya menjadi lebih cepat.



**Gambar 4.26.** Respon Kecepatan motor dengan perubahan beban selama 1 detik



**Gambar 4.27.** Respon Torsi motor dengan perubahan beban selama 1 detik

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari hasil simulasi diperoleh bahwa dengan menggunakan kontroler *neuro fuzzy* pada pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa, kontroler dapat membuat respon kecepatan aktual mengikuti kecepatan referensi dengan beberapa kondisi pengujian.

- a. Pada kondisi tanpa beban diperoleh *settling time* sebesar 1,202 detik *rise time* 0,9447 detik, *overshoot* sebesar 0,25% dan tidak ada *error steady state*.
- b. Pada beberapa kondisi pengujian dengan perubahan beban langsung seperti beban nominal, minimal dan maksimal terdapat perbedaan *rise time* sekitar 0,4 sampai 0,9 detik dan *settling time* sekitar 0,4 sampai 0,7 detik. Semakin besar nilai perubahan beban yang diberikan nilai *settling time* juga semakin lama.
- c. Pada kondisi pengujian dengan perubahan beban *gradual*, perubahan nilai kecepatan lebih kecil dibandingkan dengan perubahan beban langsung. Waktu *settling time* yang diperoleh setiap terjadi perubahan beban hampir sama yaitu sekitar 1,6 detik.

#### **5.2. Saran**

Untuk pengembangan penelitian, penulis menyarankan untuk menambahkan kontroler pada fluks referensi sehingga dapat mengatasi *ripple* pada respon keluaran motor induksi. Diharapkan kedepannya hasil simulasi yang diperoleh dapat diimplementasikan pada *plant* riil.

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

## LAMPIRAN A

### A.1. Listing Program Neuro Fuzzy

```
function [uk] = neurofuzzy(xin)
global c e de ef def r u u_num ud alpha lamda rb ey su
cc Ra Rb

y_out = xin(1);
y_model = xin(2);
e = xin(3);
de = xin(4);
tt = xin(5);

if tt == 0
    cc= 0.3964;
    Ra=40;
    Rb=40;
    c(1)=cc-Rb;
    c(2)=cc-Rb/2;
    c(3)=cc;
    c(4)=cc+Ra/2;
    c(5)=cc+Ra;
    ef = zeros(5,1);
    def = zeros(5,1);
    alpha = 0.01;
    lamda = 1;
    u_num = 0;
    ud = 0;
    su = 0;
    rb =[1 1 2 2 3
         1 2 2 3 4
         2 2 3 4 4
         2 3 4 4 5
         3 4 4 5 5];
end
for learn=1:10
% Prose Forward Layer 1 : Proses Fuzzifikasi
ef=zeros(5,1);def=zeros(5,1);
% fuzzifikasi error
if e<-2
    ef(1)=1;
elseif e<-1
    ef(1)= -1-e;
    ef(2)= e-(-2);
```

```

elseif e<0
    ef(2)= 0-e;
    ef(3)= e-(-1);
elseif e<1
    ef(3)= 1-e;
    ef(4)= e-0;
elseif e<2
    ef(4)= 2-e;
    ef(5)= e-1;
else
    ef(5)=1;
end
% fuzzifikasi delta_error
if de<-2
    def(1)=1;
elseif de<-1
    def(1)= -1-de;
    def(2)= de-(-2);
elseif de<0
    def(2)= 0-de;
    def(3)= de-(-1);
elseif de<1
    def(3)= 1-de;
    def(4)= de-0;
elseif de<2
    def(4)= 2-de;
    def(5)= de-1;
else
    def(5)=1;
end

% Layer 2 : Rule Base 3x3
for j=1:5
    for k=1:5
        r(j,k)= ef(k)*def(j);
    end
end

% Layer 3 : Inference fuzzy
u = zeros(5,1);
for l= 1:5
    for m= 1:5
        k = rb(l,m);
        u(k) = u(k)+r(l,m);
    end
end

```

```

% proses normalisasi
su=0;
uy=0;
    for o=1:5
        su = su + u(o);
    end
    for p=1:5
        uy(p)=u(p)/su;
    end
% Layer 4 : Defuzzifikasi
u_num = 0;
ud = 0;
    for n = 1:5
        zh(n)= uy(n)*c(n);
        u_num = u_num + (zh(n));
        ud = ud + uy(n);
    end

if ud == 0
    uk = 0.0001;
else
    uk = (u_num/ud);
end
ey = (y_model-y_out)*0.00903;

% Proses Backward
cc=cc+alpha*ey*1*u(3);
c(1)=cc-Rb;
c(2)=cc-Rb/2;
c(3)=cc;
c(4)=cc+Ra/2;
c(5)=cc+Ra;
u
c
end

```



## A.2. Listing Program Persamaan Model Motor induksi

```
function [dids, diqs, didr, diqr, Te] =
MOTORINDUKSI(ids, iqs, idr, iqr, vds, vqs, vdr, vqr, we, wr)
%#eml
% Parameter Motor Induksi 3 phasa
Ls = 0.3826;
Lr = 0.3808;
Lm = 0.3687;
Rs = 1.77;
Rr = 1.34;
Pl = 4;
J = 0.025;
Vd = 400;
Vdl = 460;

v = [vds;vqs;vdr;vqr];
i = [ids;iqs;idr;iqr];

P = [Rs, -we*Ls, 0, -we*Lm;
     we*Ls, Rs, we*Lm, 0;
     0, -(we-wr)*Lm, Rr, -(we-wr)*Lr;
     (we-wr)*Lm, 0, (we-wr)*Lr, Rr];

Q=[Ls, 0, Lm, 0; 0, Ls, 0, Lm; Lm, 0, Lr, 0; 0, Lm, 0, Lr];
% Persamaan state model motor induksi 3 phasa
im = (inv(Q)*v)-(inv(Q)*P*i);
dids = im(1);
diqs = im(2);
didr = im(3);
diqr = im(4);

Te = (3/2)*(Pl/2)*Lm*((iqs*idr)-(ids*iqr));
```

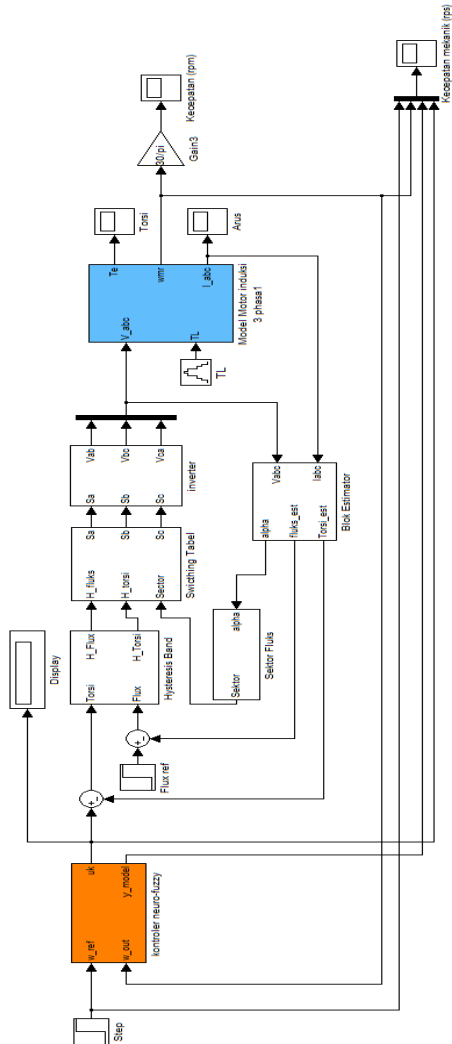
### ***A.3. List program inisialisasi parameter motor induksi 3 phasa***

```
clear;  
clc;  
  
% PARAMETER MOTOR 3 HP/2.4 kW (MOHAN)  
Ls =0.3826;  
Lr =0.3808;  
Lm =0.3687;  
Rs =1.77;  
Rr =1.34;  
Pl = 4;  
J = 0.025;  
Vd = 700;  
Vdl = 460;
```

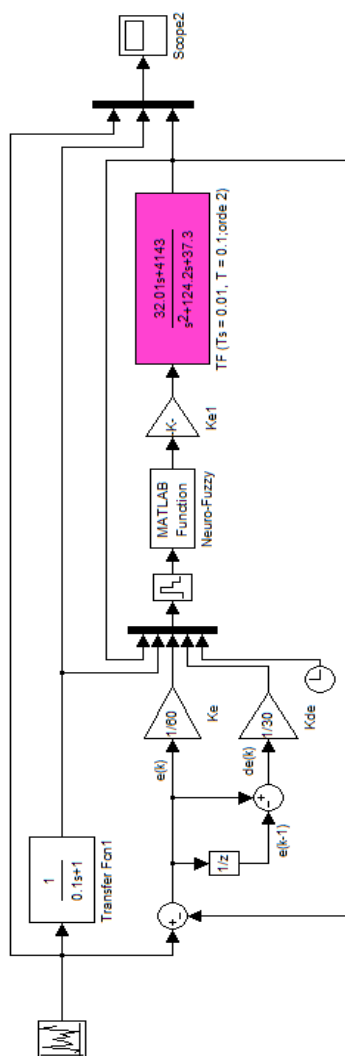
*--Halaman ini sengaja dikosongkan--*

## LAMPIRAN B

### B.1. Diagram Simulink Simulasi Sistem



## B.2. Diagram Simulink Identifikasi Sistem



## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Bose. B.K, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall Indic, 2006.
- [2]. Buja. G. S and Kazmierkowski. M. P, "DTC of pwm inverter-fed AC motors - A Survey", IEEE Trans. on Ind. Elec., volume 54, no. 5, 2004, pp. 744 – 757.
- [3]. Ramesh, Tejavathu,Panda, A.K.,Kumar,S.Shiva and Bonala, Sathyam, "High performance direct torque and flux control of induction motor drive using fuzzy logic based speed controller," *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 20-21 March 2013.
- [4]. Andrzej M. Trzynadlowski. "Control of Induction Motor". San Diego, USA : Academic Press. 2001.
- [5]. Chee Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using Matlab/Simulink", ISBN 0-13-723785-5, Prentice Hall PTR., 1998.
- [6]. N. Mohan, Advanced Electric Drives. Minneapolis, MN: MNPERE,2001.
- [7]. Kurniawan, Panji. *Perancangan Dan Simulasi Metode Direct Torque Control (DTC) Untuk Motor Induksi Tiga Fasa*. Tugas Akhir Elektro-ITS.2010.
- [8]. Sekar Rini,Widyanita. *Perancangan dan implementasi internal kontroler PI Direct Torque Control sebagai driver motor induksi*. Tugas Akhir Elektro – ITS. 2012.
- [9]. Ramadhan. Rendie. *Pengaturan proses tekanan pada sistem pengaturan berjaringan menggunakan kontroler neuro fuzzy*. Tugas Akhir Elektro – ITS.2012.
- [10]. Pradjna Paramitha, Nyoman. *Desain Kontrol Fuzzy untuk Distribusi Torsi pada Hybrid Electric Vehicle*. Tugas Akhir Elektro – ITS. 2014.
- [11]. Prasetyo Wibowo, Bayu. *Traction Control Pada Parallel Hybrid Electric Vehicle (HEV) Menggunakan Metode Kontrol Neuro-Fuzzy Prediktif*. Tugas Akhir Elektro—ITS.2014.

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Yani Ikhsan Yusuf, lahir di Klaten – Jawa Tengah pada tanggal 18 Januari 1991. Putra bungsu dari pasangan HM. Sutarto dan Sumiyatun. Setelah lulus dari SMU Negeri 1 Klaten tahun 2009, penulis melanjutkan studi di Diploma 3 jurusan Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada (UGM) dan lulus tahun 2012. Kemudian melanjutkan kuliah dengan mengambil program Sarjana Lintas Jalur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan mengambil Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro. Pada bulan Januari 2015, penulis mengikuti seminar dan ujian tugas akhir di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, ITS Surabaya sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro.



*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*